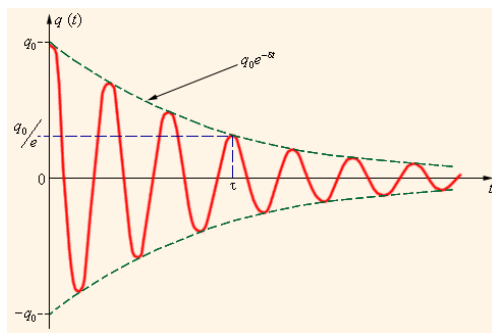


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО**  
**ГОСПОДАРСТВА**

К.Ю. Аксьонова, Ю.Д. Оксюк, Є.Б. Сидоренко

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ**  
**ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З РОЗДІЛУ**  
**„МАГНЕТИЗМ, КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ”**  
**КУРСУ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ**

(для студентів 1 курсу денної форми навчання  
бакалаврів за напрямом  
6.050701 - „Електротехніка та електротехнології”)



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з розділу „Магнетизм, колювання і хвилі” курсу загальної фізики (для студентів 1 курсу денної форми навчання бакалаврів за напрямом 6.050701 - „Електротехніка та електротехнології ” ) / Укл.: Аксьонова К.Ю., Оксюк Ю.Д., Сидоренко Є.Б. - Харків: ХНАМГ, 2008. – 73 с.

Укладачі: К.Ю. Аксьонова, Ю.Д. Оксюк, Є.Б. Сидоренко

Рецензент: проф. О.М.Петченко

Рекомендовано кафедрою фізики, протокол № 3  
від 25 жовтня 2008 р.

## **Зміст**

<b>Вступ.....</b>	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11</b>	
Дослідження залежності опору металу від температури.....	5
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12</b>	
Дослідження залежності опору напівпровідників від температури.....	10
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13</b>	
Вивчення роботи напівпровідникового діода й випрямлячів змінного струму.....	17
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14</b>	
Визначення індуктивності соленоїда.....	25
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15</b>	
Вивчення магнітних властивостей феромагнетиків.....	30
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16</b>	
Дослідження роботи трансформатора.....	40
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №17</b>	
Визначення заряду електрона методом електролізу.....	47
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №18</b>	
Дослідження повного послідовного кола змінного струму.....	51
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №19</b>	
Вивчення затухаючих коливань в RLC – контурі.....	56
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 20</b>	
Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона.....	63
<b>Список літератури.....</b>	<b>72</b>

## **Вступ**

Цей збірник лабораторних робіт є другою частиною методичних вказівок для виконання робіт фізичного практикуму з електрики і магнетизму, створеного на основі сучасного лабораторного устаткування на кафедрі фізики ХНАМГ.

Друга частина методичних вказівок містить описи лабораторних робіт з магнетизму, коливань і хвиль. Загальні свідомості про електровимірювальні прилади та умовні позначення елементів електричних ланцюгів наведено в першій частині методичних вказівок.

Загальні рекомендації з виконання лабораторних робіт з фізики надано в „Методичних рекомендаціях до організації самостійної роботи з вивчення курсу фізики”, укл. Аксьонова К.Ю., Оксюк Ю.Д., Сидоренко Є.Б. - Харків: ХНАМГ, 2008.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

### Дослідження залежності опору металу від температури

Мета роботи - експериментально встановити закон зміни опору металу або сплаву при нагріванні, знайти температурний коефіцієнт опору й за його значенням ідентифікувати даний метал.

Георг Ом експериментально встановив закон, відповідно до якого сила струму в провіднику пропорційна прикладеній до цього провідника напрузі:

$$I = \frac{1}{R} U$$

Коефіцієнт пропорційності між цими величинами називається провідністю, а зворотна їй величина - опором провідника. Величина опору залежить від форми й розмірів провідника, а також від властивостей матеріалу, з якого зроблений провідник. Для однорідного циліндричного провідника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де  $\rho$  – питомий опір речовини,  $l$  – довжина провідника,  $S$  – площа поперечного переріза провідника. Величина питомого опору визначається природою речовини й зовнішніми умовами, зокрема, температурою. Для більшості металів і сплавів питомий опір росте зі збільшенням температури приблизно за лінійним законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (1)$$

де  $\rho_0$  - питомий опір речовини при  $0^\circ\text{C}$ ,  $t$  - температура за шкалою Цельсія,  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору металу, що показує наскільки зміниться питомий опір провідника при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$  :

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t} \quad (2)$$

При низьких температурах спостерігається відхилення від цієї закономірності: у більшості металів і сплавів опір не дорівнює нулю при температурі абсолютного нуля, а спостерігається деякий залишковий опір, що

істотно залежить від чистоти металу й наявності в ньому механічних залишкових напруг. У деяких металів і сплавів спостерігається інше явище - надпровідність, тобто перетворення до нуля опору при певній температурі (дуже низької, але відмінної від абсолютного нуля). Це явище спостерігається у таких металів як ртуть, свинець, олово, цинк, алюміній і ін., а також у ряду сплавів. Для кожного надпровідника є своя критична температура, при якій він переходить у надпровідний стан.

Для зручності розрахунку перейдемо від питомих опорів речовин до опору провідників. Для цього вирази (1) і (2) помножимо на  $\frac{l}{S}$  й одержимо:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t),$$

де  $R_0$  - опір провідника при температурі  $0^\circ \text{C}$ .

Звідки

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 t}.$$

Тому що  $R_0$  невідомо, то й  $\alpha$  обчислюється по двох значеннях опорів того самого провідника, узятим при різних температурах.

$$R_1 = R_0(1 + \alpha \cdot t_1)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha \cdot t_2)$$

Розділивши друге рівняння на перше, одержимо:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \alpha \cdot t_2}{1 + \alpha \cdot t_1},$$

звідки одержимо робочу формулу:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1} . \quad (3)$$

### Опис лабораторної установки

Схема лабораторної установки наведена на рис. 11.1. Резистор ВК поміщений у термостат з нагрівачем ЕК, що підключається до джерела живлення вимикачем SA1. Величина сили струму у ланцюзі ВК встановлюється

в межах 1 - 1,3 мА й підтримується незмінною стабілітроном. Для початкової установки сили струму користуються потенціометром RP1.

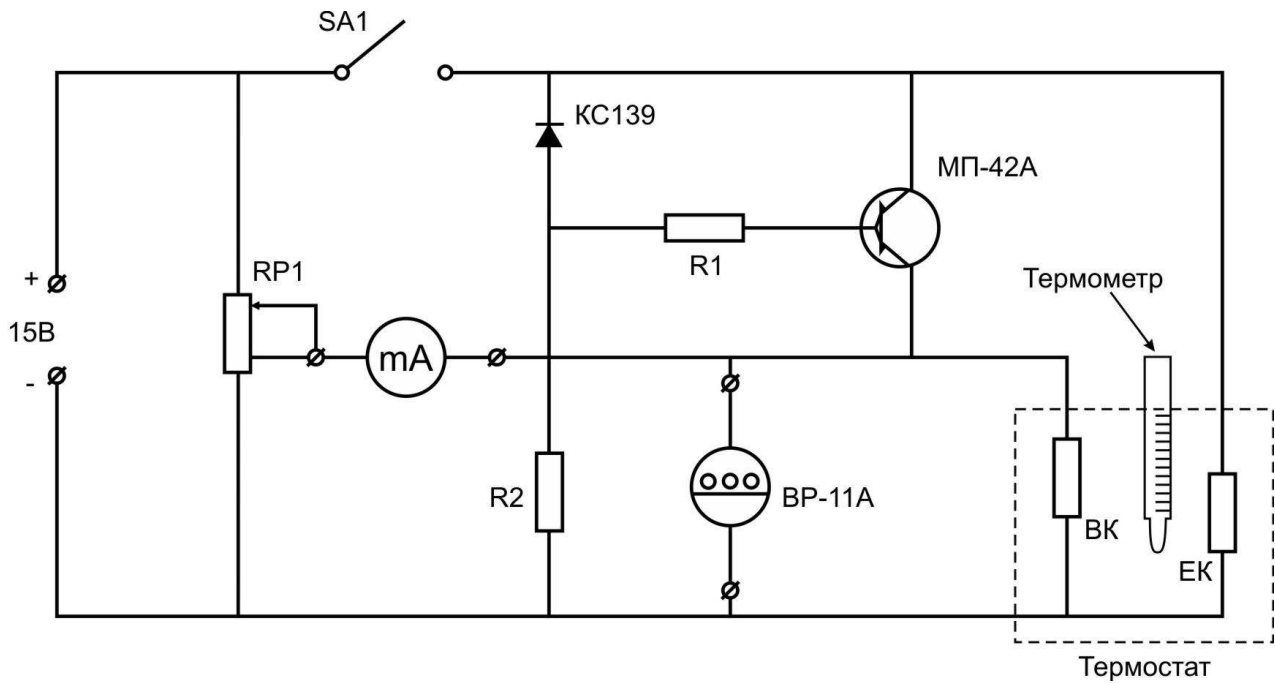


Рис. 11.1

### Прилади й приналежності

1. Експериментальна установка.
2. Джерело постійної напруги 15 В.
3. Міліамперметр постійного струму.
4. Цифровий вольтметр (мультиметр).

## Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему лабораторної установки (рис. 11.1).
2. Ввімкнути живлення тумблером SA1 і встановити потенціометром RP1 силу струму, задану викладачем.
3. Визначити й занести в таблицю 1 значення спадань напруги на резисторі ВК при зміні температури через кожні  $5^{\circ}\text{C}$ . Температура нагрівання не повинна перевищувати  $75^{\circ}\text{C}$ .
4. За отриманими експериментальними даними, користуючись законом Ома ( $I = \frac{U}{R}$ ), обчислити опір резистора ВК для всіх значень температури й занести в таблицю 1.
5. За даними таблиці 1 побудувати графік залежності  $R = f(t)$ . Нагадаємо, що це повинна бути лінійна залежність.
6. Користуючись формулою (3), обчислити температурний коефіцієнт опору металу. У формулу підставляються величини, які взяті не з таблиці, а з графіка, тобто ті, які пройшли процедуру графічного усереднення.
7. Використовуючи таблицю 2, за знайденим значенням температурного коефіцієнта ідентифікувати метал (сплав) резистора.

Таблиця 1

t, $^{\circ}\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
U, В											
R, Ом											



Таблиця 2

№	Метал, сплав	$\alpha \cdot 10^3$ , град <sup>-1</sup>
1	Алюміній	3,6
2	Залізо	5,2
3	Константан	0,01
4	Латунь	1,5
5	мідь	4,0
6	манганін	0,01
7	ніхром	0,4
8	нікель	5,4
9	олово	4,4
10	срібло	3,6

### Контрольні запитання

1. Що називається опором, провідністю? У яких одиницях вони вимірюються?
2. Пояснити механізм провідності в металах.
3. Пояснити залежність опору металу від температури.
4. У чому полягає явище надпровідності?
5. Який фізичний зміст температурного коефіцієнта опору металів?
6. Одержати формулу для розрахунку температурного коефіцієнта опору металу.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12

### Дослідження залежності опору напівпровідників від температури

Мета роботи - експериментально встановити закон зміни опору напівпровідника при його нагріванні, визначити ширину забороненої зони й концентрацію вільних носіїв заряду в напівпровіднику при різних температурах.

Напівпровідники - це кристали, які залежно від зовнішніх умов можуть бути або провідниками електричного струму або діелектриками. Напівпровідники являють собою кристали з ковалентним зв'язком.

Розглянемо будову напівпровідників з погляду квантової теорії. Відомо, що енергія електронів в атомі квантується, тобто може приймати дискретні значення, називані рівнями енергії. Дозволені рівні енергії в кристалі групуються в зони, розділені проміжками, у яких дозволених значень енергії немає (заборонені зони). Ширина дозволених і заборонених зон не залежить від розмірів кристала, тому, чим більше атомів містить кристал, тим тісніше розташовуються рівні енергії усередині зони. При температурі абсолютного нуля енергія кристала мінімальна, тому валентні електрони заповнюють попарно нижні рівні дозвленої зони, що виникла з того рівня, на якому перебувають валентні електрони (валентна зона). Більше високі дозволених зони будуть від електронів вільні. Залежно від ступеня заповнення валентної зони електронами й ширини забороненої зони можливі три випадки (рис. 12.1).

У випадку а) електрони заповнюють валентну зону не повністю. У цьому випадку електронам потрібно надати мізерно малу енергію для переходу на більш високі енергетичні рівні. Енергія, викликана дією на електрон електричного поля, виявляється достатньою для переходу електрона на більш високі рівні енергії. Тому електрони можуть прискорюватися електричним полем і здобувати додаткову швидкість у напрямку протилежному напрямку електричного поля. Таким чином, кристал з подібною схемою енергетичних рівнів являє собою метал.

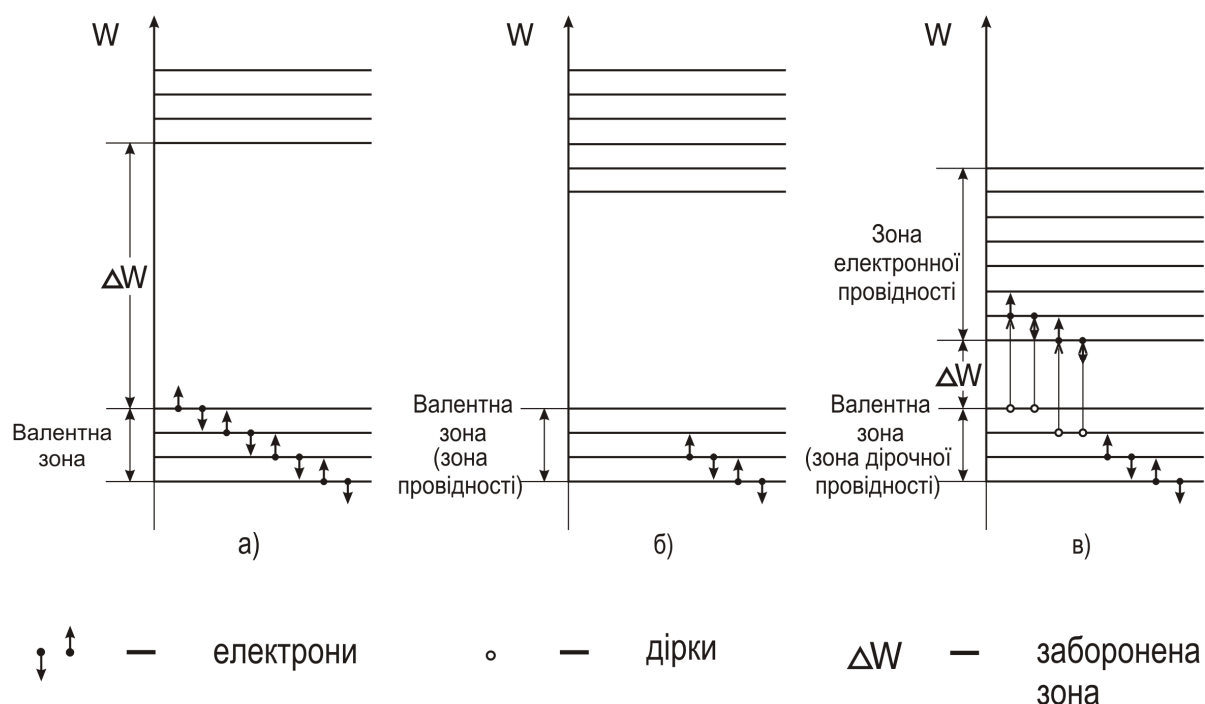


Рис. 12.1

У випадках б) і в) рівні валентної зони повністю зайняті електронами. Для збільшення енергії електрона необхідно надати його енергію не менш, ніж ширина забороненої зони  $\Delta W$ . Електричне поле надати таку енергію не може. За таких умов електричні властивості кристала визначаються шириною забороненої зони. Якщо ширина забороненої зони  $\Delta W$  невелика, енергії теплового руху виявляється досить для того, щоб перевести частину електронів у вільну зону. Тоді вільна зона виявиться для них зоною провідності. Одночасно стане можливим перехід електронів валентної зони на її верхні рівні, що звільнилися. Така речовина називається напівпровідником.

Якщо ширина забороненої зони  $\Delta W$  велика (порядку декількох електрон-вольтів), тепловий рух не зможе закинути у вільну зону помітне число електронів. У цьому випадку кристал виявляється діелектриком. Таким чином, коли  $T = 0K$  - напівпровідник є діелектриком, тому що його зона провідності порожня, а з підвищенням температури починається перехід електронів через заборонену зону із зони валентності в зону провідності. Потрапивши в зону провідності, електрони, ставши вільними, будуть носіями струму в кристалі. На місці збіглих із зони валентності електронів залишаються вакантні місця,

називані “дірками”, в яких виникає надлишковий позитивний заряд  $+e$ . На це місце може перескочити електрон однієї із сусідніх пар. У результаті “дірка” починає мігрувати по кристалу, як і вільний електрон.

У відсутності зовнішнього електричного поля електрони провідності й “дірки” рухаються хаотично. При включенні поля на хаотичний рух накладається впорядкований рух: електронів - проти поля й “дірок” - у напрямку поля. Обидва рухи приводять до переносу заряду по кристалу.

Отже, електропровідність обумовлюється як би носіями зарядів двох знаків - негативними електронами й позитивними “дірками”. Такий тип провідності називається власною провідністю й спостерігається в усіх без винятку напівпровідниках при досить високій температурі.

Кількість електронів, що перейшли в зону провідності, буде пропорційно ймовірності переходу електрона через заборонену зону при даній температурі. Оскільки провідність пропорційна числу вільних носіїв заряду, вона повинна бути пропорційна ймовірності переходу електрона в зону провідності. Залежність концентрації електронів провідності  $n$  від температури  $T$  і ширини забороненої зони  $\Delta W$  описується формулою

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right),$$

де  $n_0$  - концентрація електронів провідності при  $T \rightarrow \infty$ ,

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  - стала Больцмана.

Отже, і електропровідність напівпровідників швидко росте з підвищенням температури за законом

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right),$$

де  $\sigma_0$  - електропровідність при  $T \rightarrow \infty$ .

Тому що  $\sigma = \frac{1}{R}$ , то й опір напівпровідника зменшується з підвищенням температури за законом

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (1)$$

де  $R_0$  - опір при  $T \rightarrow \infty$ .

Користуючись цим виразом, обчислимо ширину забороненої зони напівпровідника  $\Delta W$ . Для цього прологарифмуємо вираз (1):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2kT}$$

Побудувавши графік залежності  $\ln R = f\left(\frac{1}{2kT}\right)$ , визначимо  $\Delta W$  як тангенс кута нахилу отриманої прямої до осі абсцис:

$$\Delta W = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta\left(\frac{1}{2kT}\right)}$$

Причому, якщо сталу Больцмана виразити в  $eB/K$ , то  $\Delta W$  безпосередньо з графіка теж одержимо в електрон-вольтах.

$$(k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23}}{1.6 \cdot 10^{-19}} \frac{eB}{K} = 0.863 \cdot 10^{-4} \frac{eB}{K})$$

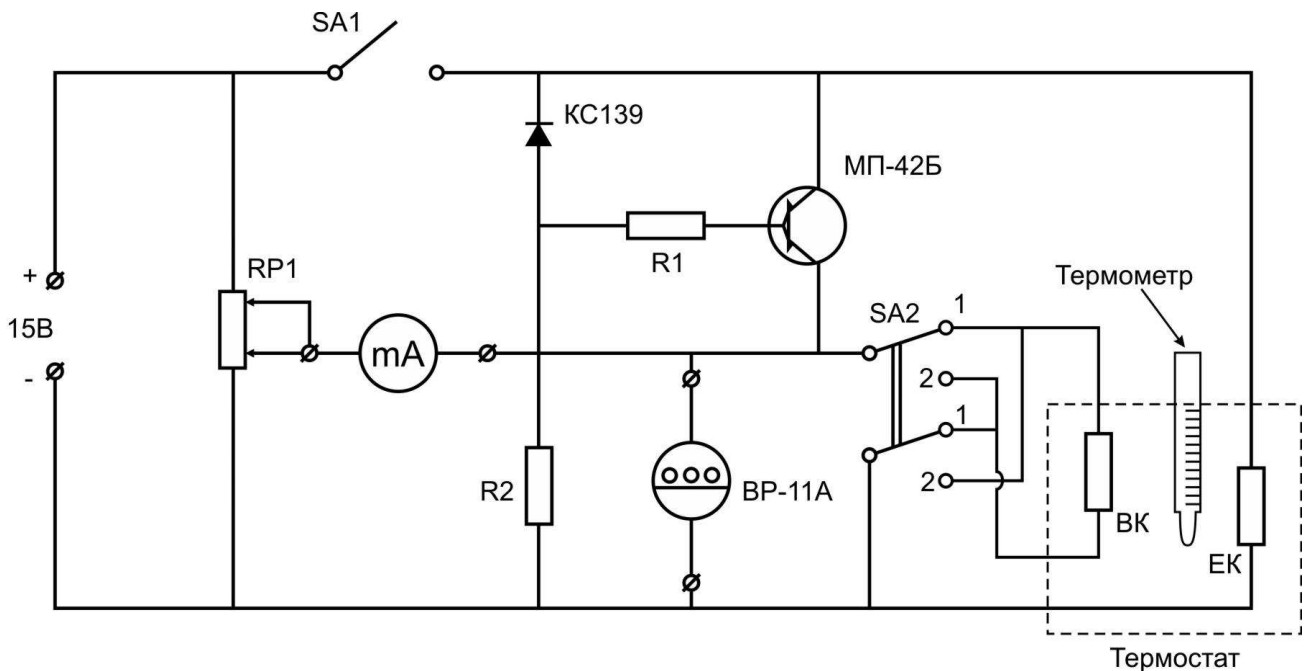


Рис.12.2

## **Опис лабораторної установки**

Для зняття залежності опору напівпровідника від температури збирається схема, зображена на рис.12.2.

Германієвий напівпровідник ВК (термоопір) поміщений у термостат з нагрівачем ЕК, що підключається до джерела живлення вимикачем SA1. Тумблер SA2 змінює напрямок струму в термоопорі ВК. Величина сили струму в колі ВК підтримується незмінною за допомогою стабілізатора при змінах опору ВК, викликаних його нагріванням. Для початкової установки сили струму використовується потенціометр RP1.

## **Прилади й приналежності**

1. Експериментальна установка (термоопір, термостат, стабілізатор сили струму).
2. Джерело постійної напруги.
3. Міліамперметр постійного струму.
4. Мультиметр.

## **Порядок виконання роботи**

1. Зібрати робочу схему (рис. 12.2).
2. Включити живлення тумблером SA1 і встановити потенціометром RP1 силу струму, зазначену викладачем (від 1 до 1,3 мА).
3. Зняти залежність спадання напруги на термоопорі від температури. Значення падінь напруги визначати при різному напрямку струму ( $U^+$  і  $U^-$ ), температура нагрівання не повинна перевищувати  $70^{\circ}\text{C}$ . Дані занести в таблицю 1.
4. За отриманим даними обчислити середні значення напруги на ВК

$$\langle U \rangle = \frac{U^+ + U^-}{2}$$

і його опір  $R = \frac{\langle U \rangle}{I}$  для всіх значень температури. Результати занести в таблицю 1.

5. Обчислити значення  $\frac{1}{2kT}eB^{-1}$  й  $\ln R$  для всіх температур і занести в таблицю 2.

6. За даними таблиці 2 побудувати графік залежності  $\ln R = f\left(\frac{1}{2kT}\right)$ .

7. За графіком визначити ширину забороненої зони германія в електрон-вольтах:

$$\Delta W = tg \alpha = \frac{\Delta(\ln R)}{\Delta\left(\frac{1}{2kT}\right)}.$$

8. Визначити концентрацію електронів провідності германія при температурі  $70^\circ C$  за формулою:

$$n_2 = n_1 \frac{R_1}{R_2},$$

де  $n_1 = 2,4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  - концентрація електронів провідності при  $T_1 = 300K$ , а  $n_2$  - при  $T_2 = 343K$ . Значення опорів можна взяти з таблиці 1 або провести екстраполяцію побудованого графіка в область цих температур і після цього визначити опір при заданих температурах.

Таблиця 1

$t^\circ C$	25	30	35	40	45	50	60	65	70
$U^+, \text{В}$									
$U^-, \text{В}$									
$\langle U \rangle, \text{В}$									
$R, \text{Ом}$									

Таблиця 2

$T, K$									
$\frac{1}{2kT} eB^{-1}$									
$\ln R$									

### Контрольні запитання

1. Які речовини називаються напівпровідниками?
2. Яка зонна модель власного напівпровідника?
3. Порівняти зонні моделі напівпровідника, діелектрика й металу.
4. Пояснити залежність опору напівпровідника від температури.
5. Який тип провідності у власних напівпровідників?
6. Пояснити виникнення “дірок” і показати їхнє розташування в зонній моделі напівпровідника.
7. Одержати робочу формулу для визначення ширини забороненої зони власного напівпровідника.
8. Одержати робочу формулу для обчислення концентрації носіїв струму в напівпровіднику при заданій температурі.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13

### Вивчення роботи напівпровідникового діода й випрямлячів змінного струму

Мета роботи - визначити залежність прямого і зворотного струмів й опору діода від напруги, вивчити роботу однонапівперіодного і двохнапівперіодного випрямлячів змінного струму.

Напівпровідниковий діод - двохелектродний напівпровідниковий прилад, дія якого заснована на електричних властивостях р-n-переходу. Існує кілька класів напівпровідникових діодів різного призначення, що відрізняються один від одного тим, що в них використовуються як різні властивості р-n-переходу, так і різні величини потужностей, струмів, напруг і діапазонів робочих частот.

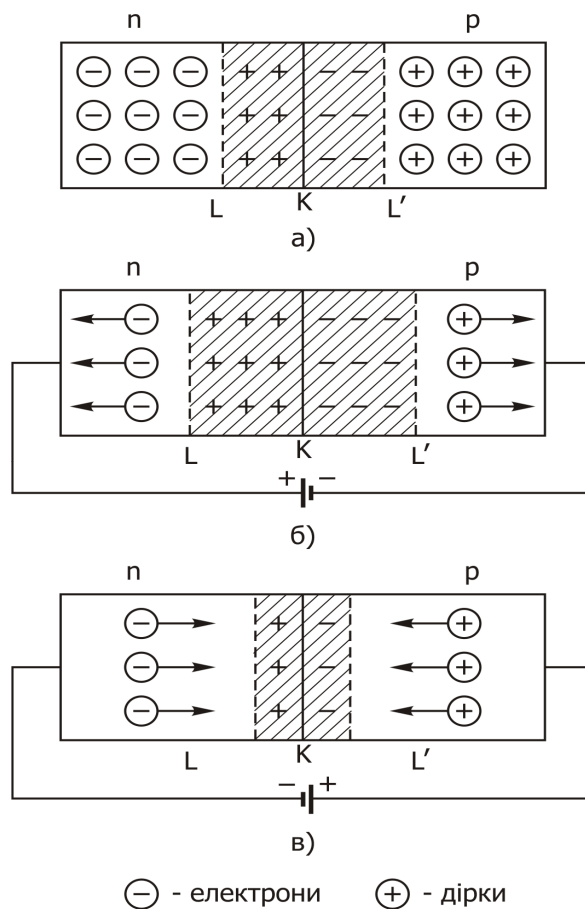


Рис.13.1

Напівпровідниковий діод являє собою кристал напівпровідника, одна частина якого має р-тип провідності, а інша - n-тип провідності (рис.13.1).

Тонкий шар на межі цих областей зветься р-n-переходом. Необхідно відзначити, що обидва типи провідності називаються домішковими, тому що в основний кристал вносять домішку іншої речовини.

Розглянемо докладніше будову й зонну модель кожної із частин напівпровідникового діода. Якщо в ковалентний кристал германія внести малу кількість іонів з валентністю на одиницю більше, ніж валентність основних атомів, то надлишковий електрон виявляється слабо пов'язаним з іонами кристалічної решітки. Він легко відщеплюється від атома за рахунок енергії теплового руху, і стає вільним носієм заряду. На відміну від випадку власної провідності, утворення вільного електрона не супроводжується утворенням "дірки". Таким чином, у напівпровіднику з домішкою, атоми якої мають валентність на одиницю більше, ніж основні атоми, є тільки один вид носіїв струму - електрони. Такий напівпровідник називається напівпровідником n-типу, а атоми домішки, що поставляють електрони провідності, називаються донорами. Домішки змінюють поле решітки, що приводить до деяких змін зонної моделі таких речовин. У схемі енергетичних рівнів з'являються додаткові локальні рівні, які розташовуються в забороненій зоні кристала в безпосередній близькості до зони провідності. Енергію, що відповідає локальному рівню, електрон може мати, перебуваючи поблизу атома домішки, який створює появу цього рівня. Енергії теплового руху досить, щоб перевести електрон з локального рівня в зону провідності (інакше кажучи, щоб зайвий електрон, що не приймає участі в утворенні ковалентного зв'язку, відірвався від атома домішки й став вільним).

На рис.13.2а) зображена зонна модель напівпровідника n-типу з донорними домішками. Розглянемо, що відбудеться, якщо в кристал увести домішкові атоми з валентністю на одиницю менше, ніж основні. Це приведе до того, що один з ковалентних зв'язків у домішкового атома виявиться

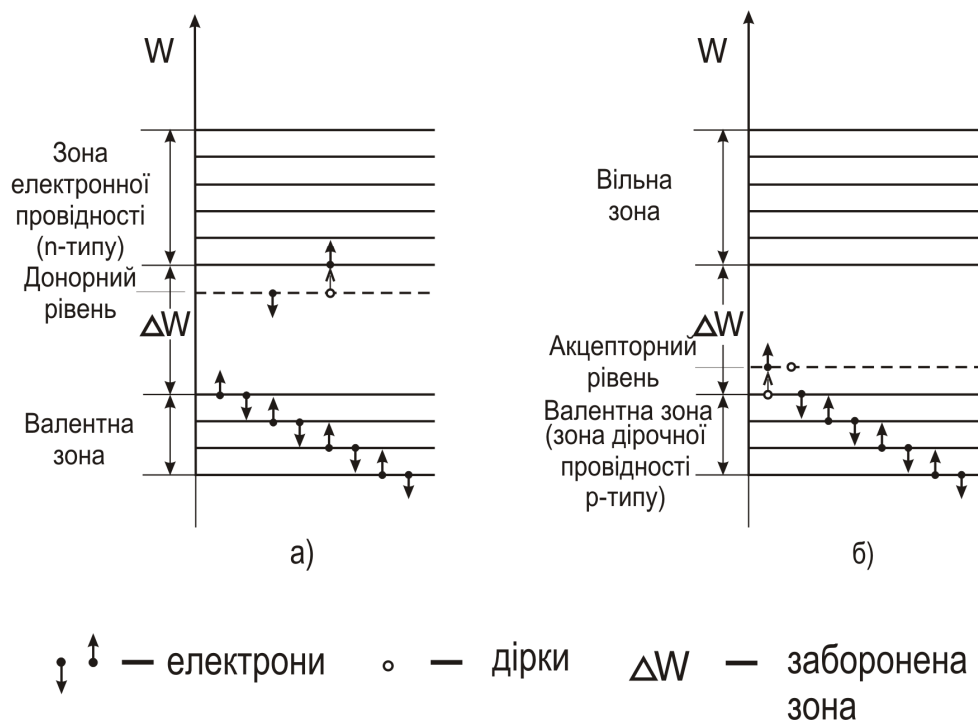


Рис.13.2

недоукомплектованим, і буде являти собою місце, здатне захопити електрон. При переході на це місце електрона однієї із сусідніх пар виникає “дірка”, що буде кочувати по кристалу. Таким чином, у напівпровіднику з таким типом домішки виникають носії тільки одного виду - “дірки”. Такі напівпровідники ставляться до р-типу провідності, а домішки, що викликають виникнення “дірок”, називаються акцепторними.

На рис.13.2б) зображена зонна модель напівпровідника р-типу з акцепторними домішками. Акцептору відповідає розташований у забороненій зоні недалеко від її дна локальний рівень. Утворенню “дірки” відповідає перехід електрона з валентної зони на акцепторний рівень.

Якщо привести в контакт два розглянутих домішкових напівпровідники, то в місці контакту почнеться дифузія в зустрічних напрямках через прикордонний шар дірок і електронів провідності, причому вони будуть рекомбінувати один з одним. У результаті рекомбінації р-n-перехід виявляється збідненим носіями струму й здобуває великий опір. Одночасно на межі між областями виникає подвійний електричний шар, утворений негативними іонами акцепторної домішки, заряд яких тепер не компенсується “дірками”, і позитивними іонами донорної домішки, заряд яких тепер не компенсується

електронами. Електричне поле в цьому шарі спрямовано так, що протидіє подальшому переходу через шар основних носіїв.

Якщо на напівпровідниковий діод подати зовнішню напругу так, щоб “+” був підключений до р-області, а “-” до n-області (такий напрямок струму називається прямим або пропускним), то потенційний бар'єр, що існує на межі р-n- областей зменшиться. При цьому зменшується опір р-n-переходу, і струм основних носіїв зростає, це прямий струм.

Зворотний напрямок (“-” до р-області, а “+” до n-області) приводить до підвищення потенційного бар'єру, збільшенню опору переходу й відповідно до зменшення струму основних носіїв. Зворотний струм малий, він обумовлений не основними носіями струму й швидко досягає насичення при збільшенні напруги. Наявність зворотного струму пов'язане з тим, що в будь-якому провіднику (і такому, котрий містить домішки) при температурі відмінної від температури абсолютного нуля завжди присутня власна провідність. Необхідно помітити, що власна провідність настає при більш високих температурах, ніж домішкова, що наочно видно з рис.13.2. Здатність напівпровідникового діода проводити електричний струм в одному напрямку краще, ніж в іншому, спричиняє його застосування для випрямлення змінного струму.

### Методика виміру й опис лабораторної установки

Електрична схема лабораторної установки для зняття характеристик напівпровідникового діода представлена на рис.13.3.

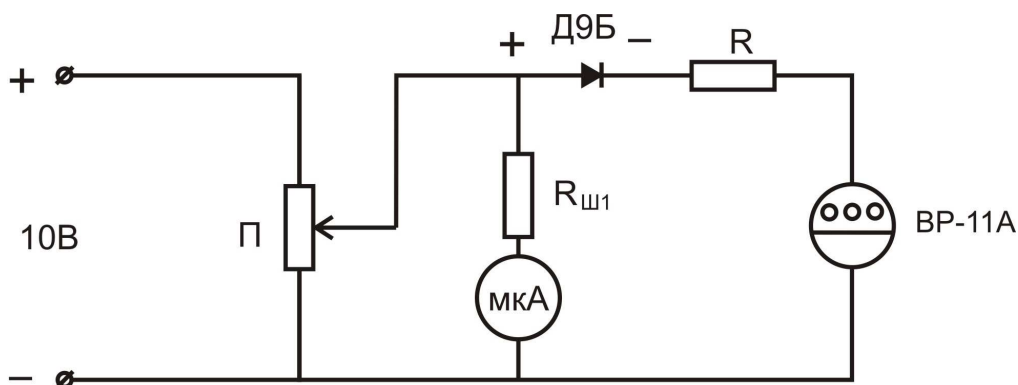


Рис.13.3

Для дослідження роботи однонапівперіодного випрямляча необхідно використовувати схему макета, наведену на рис.13.4.

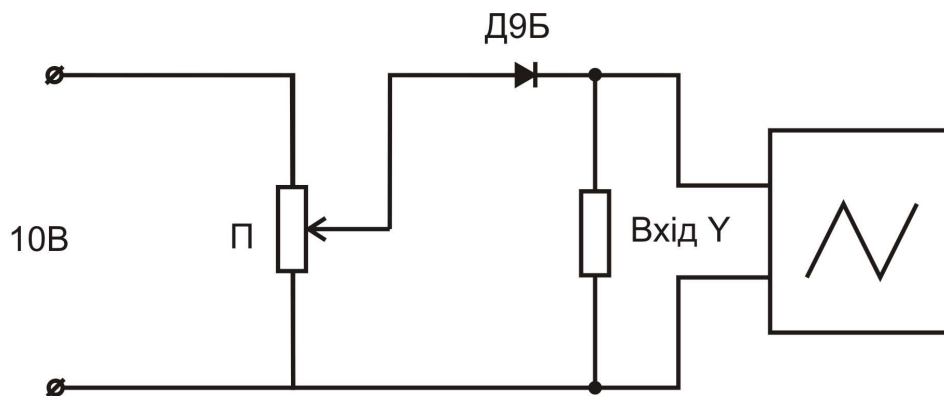


Рис.13.4

Електрична схема макета, що призначена для вивчення роботи двохнапівперіодного випрямляча, наведена на рис.13.5.

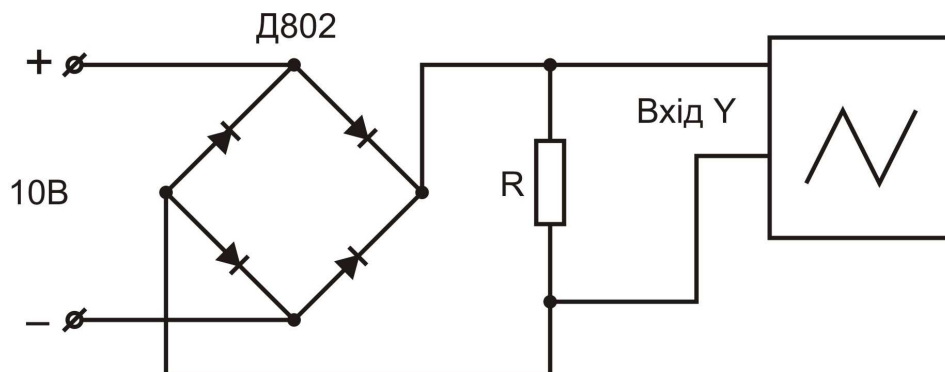


Рис.13.5

### Прилади й приналежності

1. Джерела змінної й постійної напруги  $10\text{ В}$ .
2. Потенціометр.
3. Діод Д9Б.
4. Цифровий мультиметр ВР-11А.

5. Мікроамперметр
6. Резистори.
7. Осцилограф.
8. Мостова схема випрямляча на діодах Д802.

### Порядок виконання роботи

Завдання 1. Зняття вольт-амперної характеристики діода, визначення залежності коефіцієнта випрямлення  $k$  й опору діода  $R$  від прикладеної напруги.

1.1. Зібрати схему установки, що наведено на рис.13.3. Установити потенціометр П у “нульове” положення, а прилад ВР -11А – у положення для виміру постійного струму. Як вольтметр використовується мікроамперметр із номінальним значенням сили струму  $100 \text{ мкА}$ , включений послідовно з опором  $R_1 = 980 \text{ Ом}$ . Сто розподілів шкали відповідають  $10 \text{ В}$ .

1.2. Включити електроживлення. Змінюючи потенціометром вхідну напругу через  $1 \text{ В}$  виміряти силу струму в ланцюзі діода в прямому напрямку. Результати записати в таблицю.

1.3. Змінити напрямок струму в ланцюзі діода (поміняти полярність включення діода). Установити потенціометр в “нульове” положення, а прилад ВР -11А в положення для виміру постійного струму.

1.4. Включити електроживлення. Змінюючи потенціометром вхідну напругу через  $1 \text{ В}$  виміряти силу зворотного струму в ланцюзі діода. Результати записати в таблицю.

1.5. Використовуючи даної таблиці для прямого і зворотного струмів зробити розрахунок коефіцієнтів випрямлення струму за формулою:  $k = \frac{I_{np}}{I_{obr}}$ . Дані занести в таблицю.

1.6. Використовуючи дані таблиці, обчислити напругу на діоді при прямому струмі за формулою:  $U_{\delta} = U - U_r$ , де  $U$  - вхідна напруга,  $U_r = I_{np} R$  - напруга на резисторі  $R = 300 \text{ Ом}$ . Результати занести в таблицю.

1.7. Використовуючи дані таблиці, знайти значення прямого опору діода для всіх значень напруги  $U_{\delta}$  за формулою:  $R_{np} = \frac{U_{\delta}}{I_{np}}$ . Дані знову занести в таблицю.

1.8. Знайти значення зворотного опору діода за формулою:  $R_{обр} = \frac{U_{\delta}}{I_{обр}} = \frac{U}{I_{обр}}$ . Така заміна можлива, тому що  $U_{\delta} = U - U_r = U - I_{обр} R \approx U$  ( $I_{обр}$  дуже малий). Результати занести в таблицю.

1.9. Використовуючи дані таблиці, побудувати графіки залежностей:  $I = f(U)$ ,  $k = f(U)$ ,  $R = f(U)$ .

Завдання 2. Вивчення випрямлячів змінного струму.

2.1. Зібрати схему, що наведено на рис.13.4, для дослідження роботи однонапівперіодного випрямляча. Намалювати осцилограму, отриману на екрані осцилографа.

2.2. Зібрати схему, що наведено на рис.13.5, для дослідження роботи двонапівперіодного випрямляча. Намалювати осцилограму, отриману на екрані осцилографа.

Таблиця

U, В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{np}, \text{мА}$										
$I_{обр}, \text{мкА}$										
$R_{np}, \text{кОм}$										
$R_{обр}, \text{кОм}$										
k										

## **Контрольні запитання**

1. Домішкова провідність напівпровідника, залежність її від температури.
2. Пояснити механізм донорної провідності на підставі зонної теорії.
3. Пояснити механізм акцепторної провідності на підставі зонної теорії.
4. Пристрій і робота напівпровідникового діода.
5. Намалювати схему однонапівперіодного випрямляча й пояснити його роботу.
6. Намалювати схему двохнапівперіодного випрямляча й пояснити його роботу.
7. Пояснити хід вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода.
8. Фізичний зміст коефіцієнта випрямлення і його залежність від прикладеної напруги.
9. Пояснити хід залежності опору напівпровідникового діода від прикладеної напруги.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14

### Визначення індуктивності соленоїда

Мета роботи - визначення індуктивності котушки з сердечником і без сердечника і порівняння електричного опору котушки змінного й постійного струмів.

Електричний струм, що тече у будь-якому контурі, створює пронизуючий цей же контур магнітний потік. При змінах сили струму буде змінюватися й потік  $\Phi$ , отже, у контурі виникає е.р.с. індукції. Це явище називається самоіндукцією.

За законом Біо-Савара магнітна індукція пропорційна силі струму, що викликає появу магнітного поля. Звідси витікає, що струм у контурі й створюваний їм повний магнітний потік через контур пропорційні один одному.

$$\Phi = L \cdot I \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності між потоком і силою струму називається індуктивністю контуру. Індуктивність контуру залежить від його геометрії (форми, розмірів) і від магнітних властивостей того середовища, у якому перебуває контур (від його магнітної проникності  $\mu$ ). Якщо розглядати не контур, а соленоїд, то виявляється, що його індуктивність теж залежить від його розмірів, числа витків і магнітних властивостей навколишнього середовища (у випадку соленоїда має значення тільки область усередині нього, тому що саме там і зосереджене поле соленоїда, тобто наявність у ньому сердечника). При проходженні змінного струму через соленоїд виявляється, що він крім омичного (активного) опору  $R$  володіє й реактивним індуктивним опором  $X_L = \omega L$ . Величина індуктивного опору росте із частотою, при проходженні через соленоїд постійного струму реактивний опір стає рівним нулю. Крім того, величина  $X_L$  істотно залежить від наявності сердечника в соленоїді.

Розглянемо електричне коло, що складається з котушки індуктивності, яка володіє активним опором  $R$ . Схематично це можна зобразити як послідовне включення активного опору  $R$  й котушки з індуктивністю  $L$  (рис.14.1).

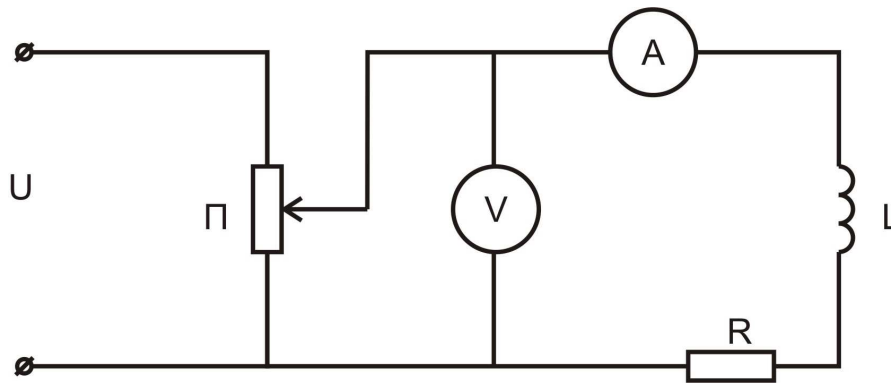


Рис.14.1

При подачі в ланцюг змінної напруги  $U$  із частотою  $\omega$  в ньому виникає змінний струм тієї ж частоти, амплітуда  $I_m$  й фаза якого визначаються параметрами  $R$  й  $L$ . Проходження струму викличе на активному опорі спадання напруги  $U_R$ , амплітуда якого дорівнює  $U_m = I_m R$ , фаза збігається з фазою струму. Тому на векторній діаграмі (рис.14.2) напрямок  $U_R$  збігається з напрямком сили струму  $I$ :

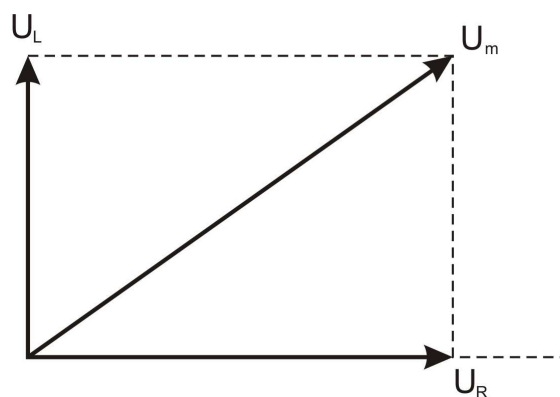


Рис.14.2

Падіння напруги на котушці індуктивності  $U_L$  випереджає струм за фазою на  $\pi/2$ . Тому вектор  $U_L$  повернутий щодо осі  $I$  на кут  $\pi/2$  проти годинникової стрілки і його максимальне значення дорівнює

$$U_{mL} = \omega \cdot L \cdot I_m.$$

З рис.14.2 видно, що  $U_m$  можна знайти за теоремою Піфагора:

$$U_m^2 = (I_m R)^2 + (\omega L \cdot I_m)^2,$$

звідки

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (2)$$

Отриманий вираз не що інше, як закон Ома для ланцюга змінного струму, тому вираз

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3)$$

є повний опір розглянутого ланцюга.

Визначивши опори  $Z$  і  $R$  експериментально й знаючи циклічну частоту  $\omega$ , можна зробити розрахунок індуктивності соленоїда:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad (4)$$

де  $f$  - частота подаваного змінного струму.

### Методика виміру й опис установки

Принципова схема експериментальної установки представлена на рис.14.3.

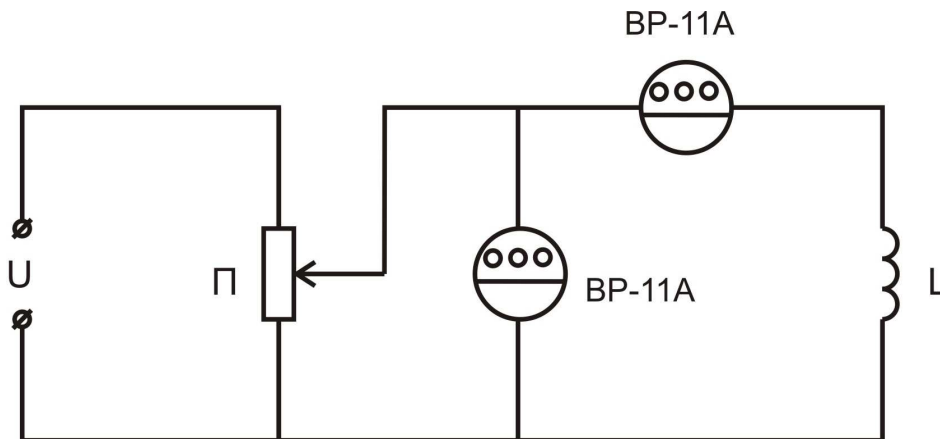


Рис.14.3

## Прилади й приналежності

1. Котушка індуктивності.
2. Набір осердів з різних матеріалів.
3. Вольтметр і амперметр змінного і постійного струмів (або два цифрових мультиметри).
4. Резистор із змінним опором.
5. Джерело постійної напруги.
6. Джерело змінної напруги.

## Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему лабораторної установки за рис.14.3.
2. Одержати завдання у викладача на виконання лабораторної роботи (конкретний набір осердів, межі зміни постійного і змінного струмів ).
3. Зняти залежності  $U = f(I)$  й занести їх у таблицю для:
  - а) постійного струму;
  - б) змінного струму за умови, що в котушці осердя відсутнє;
  - в) змінного струму за умови, що феромагнітне осердя перебуває в котушці.
4. За отриманим даними побудувати графіки залежностей  $U = f(I)$ .
5. Користуючись графіками, визначити  $R$  і  $Z$  для всіх кривих за формулами:

$$R = \frac{\Delta U_1}{\Delta I}; Z_2 = \frac{\Delta U_2}{\Delta I}; Z_3 = \frac{\Delta U_3}{\Delta I},$$

де індекси 1,2,3 відносяться до графіку для постійного струму, графіку для змінного струму, але без осердя, графіку для змінного струму із осердям, відповідно.

7. За отриманим даними провести розрахунок  $L$  для котушки з осердям і без осердя.
8. Провести розрахунок похибки вимірів.

Таблиця

I, мА									
U <sub>1</sub> , В									
U <sub>2</sub> , В									
U <sub>3</sub> , В									

### Контрольні запитання

1. У чому полягає явище самоіндукції?
2. Що називається магнітним потоком?
3. Дати визначення індуктивності. Одиниця виміру індуктивності в системі СІ.
4. Від чого залежить індуктивність соленоїда?
5. Що називається індуктивним і активним опорами?
6. Записати закон Ома для ланцюга змінного струму в загальному виді.  
Повний опір ланцюга змінного струму.
7. Одержати робочу формулу (4).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

### Вивчення магнітних властивостей феромагнетиків

#### Мета роботи:

- дослідження процесів намагнічування різних феромагнетиків у змінних магнітних полях,
- визначення залежності магнітної проникності феромагнетиків від зовнішнього магнітного поля,
- визначення величини залишкової індукції і коерцитивної сили,
- визначення втрат енергії при перемагнічуванні.

Всі речовини в природі за своїми магнітними властивостями підрозділяються на три види: **діамагнетики**, **парамагнетики**, **феромагнетики**). Магнітну активність проявляють всі речовини без винятку, тому можна припустити, що магнітні властивості речовини визначаються елементарними частками, що входять до складу кожного атома (електронами, протонами, нейтронами). Дослідження показали, що магнітні моменти нейтронів і протонів на три порядки нижче найменшого магнітного поля електрона, тому можна вважати, що магнітні властивості атома визначаються його електронами.

Усякий атом являє собою динамічну систему, що складається з ядра й електронної хмари. Кожний електрон має певний спіновий момент  $P_{cn}$ , крім того, рух електрона по деякій замкнутій орбіті усередині атома створює так званий орбітальний магнітний момент  $P_{op}$ . Отже, повний магнітний момент атома  $P_{am}$  буде являти собою векторну суму орбітальних і спінових магнітних моментів електронів, що належать даному атому

$$\vec{P}_{am} = \sum_{i=1}^z \vec{P}_{op,i} + \sum_{i=1}^z \vec{P}_{cn,i},$$

де  $z$  - число електронів в атомі.

Розглянемо процеси в атомах, молекулах і кристалах, які визначають приналежність даної речовини до одного з перерахованих видів магнетиків.

Діамагнітний ефект обумовлений дією зовнішнього магнітного поля на орбітальний рух електронів, тобто він властивий всім атомам і молекулам. Таким чином, діамагнітні властивості обов'язково будуть проявлятися в тих речовинах, у яких сумарний магнітний момент атома або молекули дорівнює нулю. Для здійснення цієї вимоги потрібно, щоб всі орбітальні й спінові магнітні моменти були скомпенсовані. До діамагнетиків належать, наприклад, інертні гази, *Cu, Ag, Sb, Bi, Pb, Zn, C, Hg, Si, Ge, Sn* і ін.

Під дією зовнішнього магнітного поля відбувається прецесія електронних орбіт з однаковою для всіх електронів кутовою швидкістю. Обумовлений прецесією додатковий рух електронів приводить до виникнення індукованого магнітного моменту атома, спрямованого проти поля. Магнітна проникність діамагнетиків  $\mu < 1$  і практично не залежить від температури.

Парамагнітний ефект проявляється в речовинах, у яких магнітний момент атома або молекули відмінний від нуля. Якщо повний магнітний момент атома або молекули при відсутності зовнішнього магнітного поля відмінний від нуля, то кожний атом (або молекула) буде поводитися як елементарний магнітик. Очевидно, що накладення зовнішнього магнітного поля сприяє впорядкованій орієнтації елементарних магнітних моментів уздовж напрямку поля. Тепловий рух, навпаки, буде прагнути порушити створювану полем упорядковану орієнтацію. У результаті боротьби цих двох протилежних тенденцій установиться рухлива рівновага з певним ступенем упорядкованості орієнтації магнітних моментів атомів і молекул. При вимиканні зовнішнього магнітного поля тепловий рух призводить до зникнення упорядкування магнітних моментів ( $\mu > 1$ ).

Феромагнетизм ( $\mu \gg 1$ ) спостерігається в матеріалах, де також як і в парамагнетиках, магнітні моменти молекул не виникають під дією зовнішнього поля, а існують незалежно від нього. Різниця полягає в тому, що в феромагнетику спіни сусідніх атомів уже з самого початку в якомусь ступені

орієнтовані відносно один одного. Це не означає, що зразок у цілому однорідно намагнічений (наприклад, шматок м'якого заліза не є магнітом).

Виявляється, що найбільш вигідно в енергетичному змісті, щоб зразок складався з великого числа малих однорідно намагнічених областей (доменів). Усередині кожного домену намагніченість однорідна, але напрямок вектора цієї мимовільної (спонтанної) намагніченості змінюється від одного домену до іншого. Таким чином, у відсутності магнітного поля зразок у цілому не намагнічений (розміри доменів лежать у межах від  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  м).

Феромагнетики є сильномагнітними речовинами – їх намагнічування у величезне число разів (до  $10^{10}$ ) перевершує намагнічування парамагнетиків, крім того, намагнічування феромагнетиків не зникає після вимикання магнітного поля. До числа таких речовин належать елементи VIII групи періодичної системи елементів Д.І.Менделєєва (*Fe, Ni, Co*) й деякі рідкоземельні елементи (*Gd, Ho, Er*) і їхні сплави. Феромагнетизм властивий всім цим речовинам тільки в кристалічному стані й у певному інтервалі температур. При нагріванні їх вище деякої температури, що носить назву температури Кюрі, феромагнетизм зникає, і речовина стає парамагнетиком.

Основні властивості феромагнетиків такі:

1. Магнітна проникність феромагнетиків складним образом залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля.
2. Феромагнетики мають залишковий магнетизм, тобто вони можуть зберігати стан намагніченості при відсутності поля, що намагнічує. Залишковий магнетизм є результатом магнітного гістерезису, що спостерігається при перемагнічуванні феромагнетика й проявляється в тому, що зміна намагніченості феромагнетика в змінному полі відстає від зміни напруженості поля, що намагнічує.

Криві, отримані при поступовому збільшенні поля (вихідним є повністю розмагнічений стан зразка), називаються основними кривими намагнічування (рис.15.1, крива 0-1).



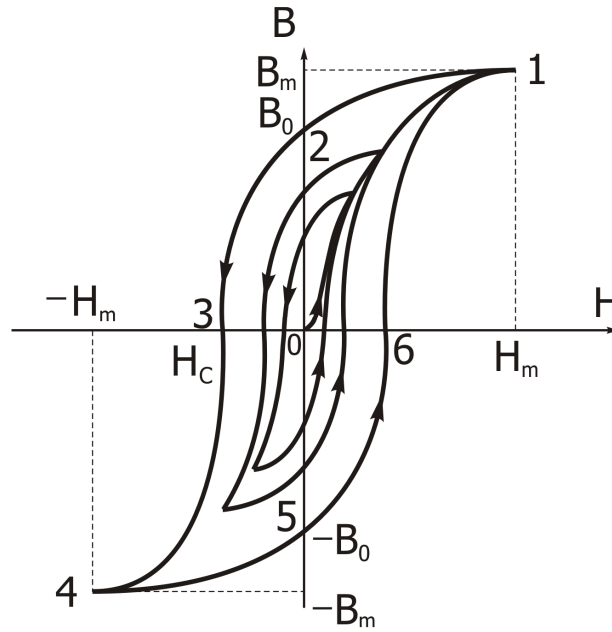


Рис.15.1

Характерне для феромагнетиків запізнювання магнітної індукції в порівнянні з напруженістю зовнішнього магнітного поля (явище гістерезису) графічно представлено на рис.15.1. Ця залежність називається петлею гістерезису. Гістерезис обумовлений необоротністю процесів намагнічування, що й приводить до втрат енергії.

Для матеріалів, використовуваних як осерді, такі втрати приводять до зниження якості пристроїв, у яких вони застосовуються. Однак, така незворотність іноді корисна, тому що саме завдяки їй матеріал залишається намагніченим після того, як поле, що намагнічує, стає рівним нулю, тобто стає сталим магнітом.

Розглянемо докладніше процес намагнічування феромагнетика. На рис.15.1 показана залежність проекції вектора  $\vec{B}$  на напрямок напруженості зовнішнього магнітного поля  $\vec{H}$  від величини  $H$ . Зі збільшенням  $H$  від 0 до  $H_m$  (ділянка 0-1), проекція  $\vec{B}$  збільшується від 0 до  $B_m$ . Це – основна крива намагнічування. При зменшенні напруженості поля від  $H_m$  до 0 величина  $B$  убуває не до нуля, а до значення  $B_0$  (ділянка 1-2). При зміні знака проекції

напруженості поля  $\vec{H}$  і збільшенні її від 0 до  $-H_m$ ,  $B$  буде зменшуватися, і досягне значення  $B=0$  при  $H=H_c$  (ділянка 2-3), а при подальшому збільшенні величини  $H$  проекція вектора  $\vec{B}$  досягає значення  $-B_m$  (ділянка 3-4). При наступній зміні проекції напруженості поля від  $-H_m$  до  $+H_m$  проекція  $\vec{B}$  змінюється від  $-B_m$  до  $+B_m$ , причому зміна відбувається за кривою 4 – 5 – 6 – 7. Таким чином, при зміні проекції напруженості поля від  $+H_m$  до  $-H_m$  і від  $-H_m$  до  $+H_m$  залежність  $B$  від  $H$  описується замкнутою кривою, називаною статичною петлею гістерезису. Величини  $B_0$  (залишкова індукція) і  $H_c$  (коерцитивна сила) є важливими характеристиками феромагнетика. Якщо коерцитивна сила велика, то феромагнетик називають магнітно-стійким. Такі матеріали застосовуються для виготовлення сталих магнітів. Феромагнетики з малою коерцитивною силою  $H_c$  називаються магнітно-м'якими, тому що вони легко розмагнічуються. Такі речовини застосовуються для осердь трансформаторів, електромагнітів і т.і.

Важливою характеристикою феромагнетиків є залежність магнітної проникності від величини напруженості зовнішнього магнітного поля  $\mu(H)$ . Тому що це складна функція, то з її допомогою можна вибрати оптимальні умови, при яких дана речовина може використовуватися з найбільшою користю. Залежність  $\mu(H)$  для феромагнетиків звичайно визначають тільки для основної кривої намагнічування (рис.15.1).

Необхідно відзначити, що процес намагнічування феромагнетика є незворотним. Робота з перемагнічування феромагнетика пропорційна площі петлі гістерезису.

## Методика виміру

Електрична схема лабораторної установки наведена на рис.15.2.

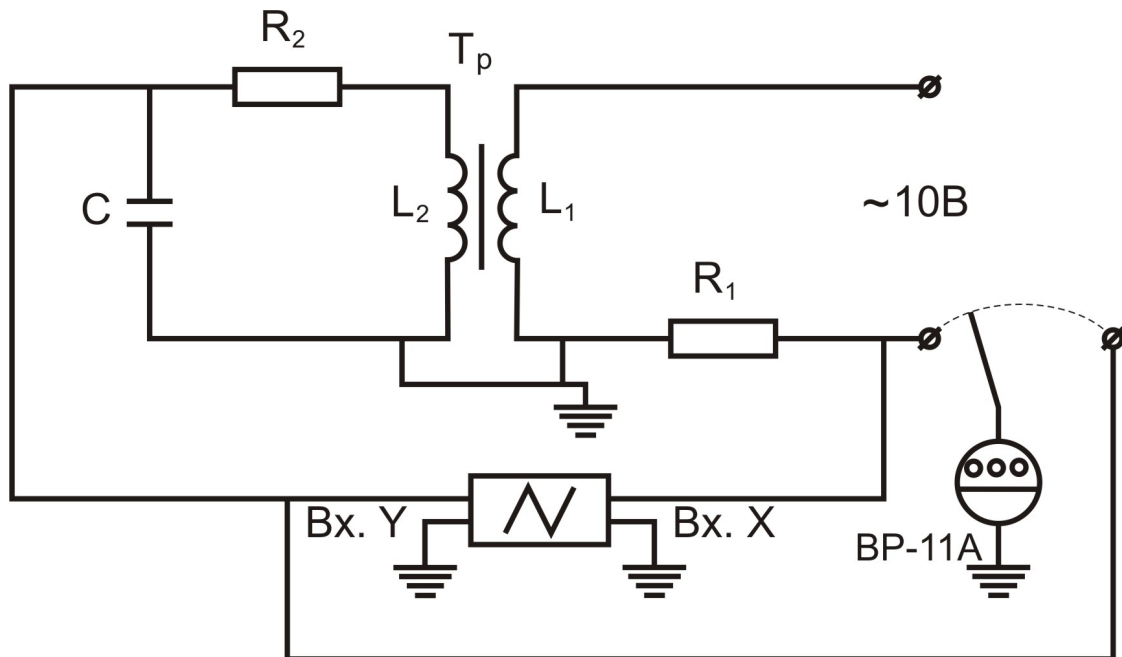


Рис.15.2

Феромагнітне осердя у даній роботі має форму тороїда. Первинна обмотка тора з опором  $R_1$  при проходженні по ній струму  $I_1$  із частотою 50 Гц створює магнітне поле  $H_1 = I_1 n_1$ , де  $n_1$  - число витків на одиницю довжини в первинній обмотці. При цьому в сердечнику виникає індукція  $B_1$ .

У вторинній обмотці опір  $R_2$  і конденсатор служать для синхронізації фаз напруг первинної й вторинної обмоток трансформатора. Напруга на конденсаторі  $U_c$  пропорційна збільшенню індукції  $B$  в зразку:

$$U_c = \frac{N_2 S}{C R_2} B, \quad (1)$$

де  $N_2$  - число витків у вторинній обмотці,

$S$  - площа перерізу тороїда.

Формула (1) може бути отримана в такий спосіб:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{\int i_2 dt}{C} = \frac{\int E dt}{R_2 C} = \frac{-\int d\Phi}{R_2 C} = -\frac{N_2 S B}{R_2 C},$$

де  $q$  - заряд конденсатора,

$i_2$  - сила струму вторинної обмотки,

$d\Phi$  - зміна магнітного потоку через вторинну обмотку за час  $dt$ .

Вважаючи  $i_2 = \frac{E}{R_2}$ , ми зневажаємо спаданням напруги на всіх інших

ділянках електричного кола, крім ділянки з опором  $R_2$ , тому що опір  $R_2$  дуже великий.

Напруга  $U_c$  подається на  $Y$ -пластини осцилографа, а  $U_x$ , що знімається з опору  $R_1$ , який має первинна обмотка, - на  $X$ -пластини. Напруга  $U_x$  пропорційна силі струму в первинній обмотці, тобто напруженості магнітного поля:

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{H R_1}{n_1} = \frac{H R l_1}{N_1}, \quad (2)$$

де  $N_1$  - число витків первинної котушки,

$l$  - її довжина.

За один період синусоїдальної зміни струму електронний промінь описує на екрані осцилографа повну петлю гістерезису, що у точності повторюється в наступні періоди. Така петля називається динамічною петлею, на відміну від статичної, котра виходить при повільній зміні  $H$ . Змінюючи за допомогою потенціометра  $R_1$  напруженість магнітного поля  $H$ , можна одержати на екрані осцилографа сімейство петель гістерезису, що розрізняються за своєю площею. Для побудови основної кривої намагнічування  $B(H)$  треба визначити на осцилограмі координати вершин петель гістерезису й визначити масштабні коефіцієнти по осях  $X$  і  $Y$ . Значення індукції й напруженості магнітного поля тоді можна розрахувати за формулами:

$$H = \frac{U_{R_1} h_1}{l R_1} \quad (3)$$

$$B = \frac{U_y R_2 C}{n_2 S} \quad (4)$$

Обчислюючи значення  $B$  і  $H$  для всіх спостережуваних петель гістерезису, можна обчислити для кожної пари значення  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5)$$

Площа динамічної петлі гістерезису більш площі статичної петлі, тому що вона містить у собі втрати енергії не тільки на магнітний гістерезис, але й втрати на вихрові потоки й магнітну в'язкість. Величина втрат  $W$  на один цикл перемагнічування обчислюється за формулою:

$$\Delta A = B \Delta S V \quad (6)$$

$$\frac{\Delta A}{V} = B \cdot \Delta H = S_0,$$

де  $V$  - об'єм осерді,

$S_0$  - площа петлі гістерезису.

1 мм<sup>2</sup> площі петлі відповідає роботі:

$$\varpi = \Delta B \cdot \Delta H \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{мм}^2} \right),$$

$$\text{тоді } \frac{\Delta A}{V} = \varpi \cdot S_0 V \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right),$$

$$\Delta A = \varpi \cdot S_0 V (\text{Дж}).$$

### Прилади й принадлежности

Джерело регульованої змінної напруги (до 10 В), набір трансформаторів, осцилограф, мультиметри, конденсатор і набір резисторів, сполучні провідники.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою й одержати завдання у викладача.

2. Зібрати робочу схему (рис. 15.2) з заданими значеннями ємності й опорів.
3. Включити установку й для різних вхідних напруг зафіксувати на координатній сітці крайні положення точок кожної петлі гістерезису.
4. Визначити масштабні коефіцієнти по осях  $x$  і  $y$ .
5. Зняти зображення максимальних петель гістерезису для різних матеріалів на папір з нанесеною на нього координатною сіткою.
6. Побудувати графік залежності  $B = f(H)$ , використовуючи формули (3), (4) і масштабні коефіцієнти.
7. Побудувати графік залежності  $\mu = f(H)$ , використовуючи формулу (5).
8. Знайти значення залишкової індукції  $B_0$  й коерцитивної сили  $H_c$  для різних матеріалів і охарактеризувати їх (використовувати п.5).
9. Знайти роботу перемагнічування осердя, використовуючи формулу (5) і п.5.

### Необхідні дані

#### 1. Параметри тороїдальних трансформаторів

	Тр I	Тр II	Тр III
$S, \text{мм}^2$	50	40	54
$l_1, \text{мм}$	130	116	57
$n_1$	500	500	400
$n_2$	750	800	600
$R_1, \text{кОм}$	25(8)	210(52)	25(30)

2  $R_2 = 18 \text{ кОм}; \quad C = 10 \text{ мкФ}.$

### 3. Таблиця вимірів.

#### 1) Трансформатор I (II, III).

$X$ , под.	
$Y$ , под.	
$U_{R1}$ , В	
$U_y$ , В	
$H$ , $\frac{A}{M}$	
$B$ , Тл	
$\mu$	

#### 2) Трансформатор I (II, III).

$B_0$ , Тл	
$H_c$ , $\frac{A}{M}$	
$\Delta A$ , Дж	

### Контрольні запитання

1. Класифікація магнетиків.
2. Які властивості діа- і парамагнетиків?
3. Які властивості феромагнетиків?
4. У чому полягає явище магнітного гістерезису?
5. Фізичний зміст площі статичної й динамічної петель гістерезису.
6. Пояснити хід кривої  $\mu = f(H)$ .
7. Фізичний зміст вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ .
8. Залишкова індукція й коерцитивна сила. Магнітно-м'які й магнітно-стійкі феромагнетики.
9. Намалювати й пояснити схему лабораторної установки.
10. Одержати формули для обчислення  $B$  і  $H$  у лабораторній роботі.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16

### Дослідження роботи трансформатора

Мета роботи - дослідження роботи однофазного трансформатора в різних режимах, визначення коефіцієнта трансформації й коефіцієнта корисної дії трансформатора, визначення залежності КПД однофазного трансформатора від вхідної напруги при постійному навантаженні вторинної обмотки.

Для багатьох технічних і лабораторних цілей буває необхідно мати більш високі (або низькі) е.р.с., чим ті, які дають електричні машини. Особливо важливо в техніці мати високі е.р.с. при передачі електричної енергії по довгим проводам з одного місця до іншого. Це пов'язане з тим, що втрати енергії в передавальних проводах тим більше, чим більше сила струму. Тому для зменшення шкідливих втрат зручно мати справи з великими е.р.с. і малими силами струму.

Трансформатор являє собою статичний електромагнітний пристрій для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги при незмінній частоті. В основі роботи трансформатора лежить закон електромагнітної індукції Фарадея, відповідно до якого в обмотці трансформатора, яку пронизує магнітний потік, виникає е.р.с. Трансформатор у найпростішому виді складається з двох обмоток, намотаних на загальне замкнуте залізне осердя. Розглянемо підвищувальний трансформатор. Первинна обмотка I складається з невеликого числа витків товстого дроту, вторинна обмотка II – з більшого числа витків більш тонкого дроту. Первинний струм, що проходить через обмотку I, створює змінний потік магнітної індукції  $\Phi$  II. Будемо вважати, що активний опір обмотки надзвичайно малий, тому е.р.с.  $\varepsilon_1$ , що діє в первинній обмотці, чисельно дорівнює й протилежна за знаком виникаючої в ній е.р.с. самоіндукції  $\varepsilon_c$  :

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_c \quad (1)$$



У кожному витку первинної обмотки виникає е.р.с. самоіндукції, що дорівнює  $-\frac{d\Phi}{dt}$ , звідки

$$\varepsilon_c = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

де  $N_1$  - число витків первинної обмотки. Звідси для е.р.с.  $\varepsilon_1$ , що діє в первинній обмотці, одержуємо:

$$\varepsilon_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Той же потік  $\Phi$  пронизує вторинну обмотку, тому в кожному її витку виникає е.р.с.  $-\frac{d\Phi}{dt}$ , а у всій вторинній обмотці виникає е.р.с.  $\varepsilon_2$ , що дорівнює:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

де  $N_2$  - число витків у вторинній обмотці. Порівнюючи вирази (3) і (4), одержуємо

$$\varepsilon_2 = -\frac{N_2}{N_1} \varepsilon_1. \quad (5)$$

Таким чином, трансформатор підвищує е.р.с. пропорційно відношенню числа витків вторинної й первинної обмоток. Знак мінус указує на те, що е.р.с. у первинній і вторинній обмотках протилежні за фазою.

Уважаючи, що в сучасних трансформаторів потужності, що розвиваються в первинному й вторинному ланцюгах, практично рівні, одержимо:

$$\varepsilon_1 I_1 = \varepsilon_2 I_2. \quad (6)$$

Звідки, використовуючи рівність (5), для перетворення струму маємо:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1. \quad (7)$$

Розглянемо різні режими роботи трансформатора.

1. Режим холостого ходу - це такий режим роботи трансформатора, при якому до первинної обмотки підводиться деяка напруга, а вторинна обмотка розімкнута, із чого витікає, що струм у вторинній обмотці надзвичайно малий (рис.16.1). Потужність, споживана трансформатором з мережі в

режимі холостого ходу, складається із втрат у первинній обмотці й у магнітопроводі. Тому що ці втрати малі, то ними можна зневажити, тобто можна сказати, що в режимі холостого ходу електрична енергія через трансформатор не передається.

Коефіцієнтом  $k$  трансформації називають відношення е.р.с. вторинної обмотки до е.р.с. первинної обмотки:

$$k = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (8)$$

Зневажаючи спаданнями напруги в обмотках трансформатора в режимі холостого ходу, коефіцієнт трансформації можна визначити як

$$k = \frac{U_2}{U_1}. \quad (9)$$

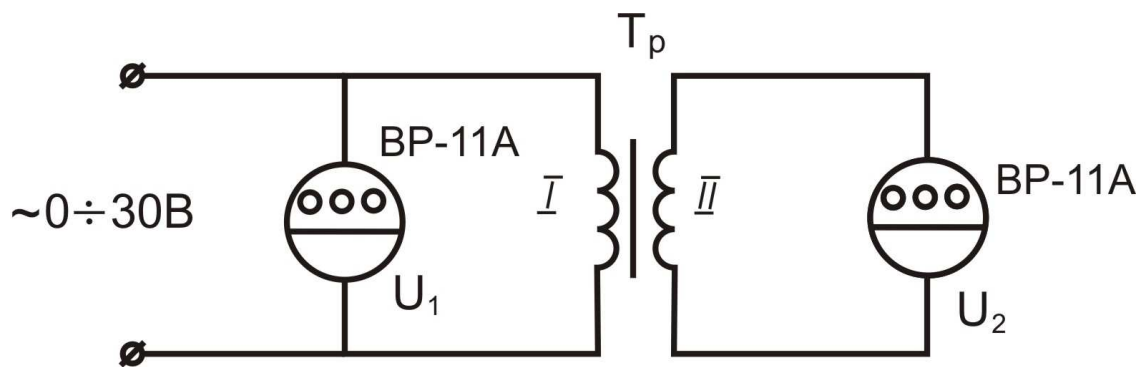


Рис.16.1

2. Режим короткого замикання - це такий режим, при якому одна з обмоток трансформатора живиться від джерела зі змінною напругою, а затиски другої обмотки замкнуті на коротко (рис.16.2). Тому що напруга на первинній обмотці в такому режимі дуже мала, то втратами в магнітопроводі можна зневажити, а вважати, що основні втрати відбуваються в обмотках. Коефіцієнт трансформації в цьому випадку обчислюється за формулою (7). Слід зазначити, що корисна робота в режимі короткого замикання не

відбувається, тому що споживана потужність дорівнює втратам потужності в обмотках.

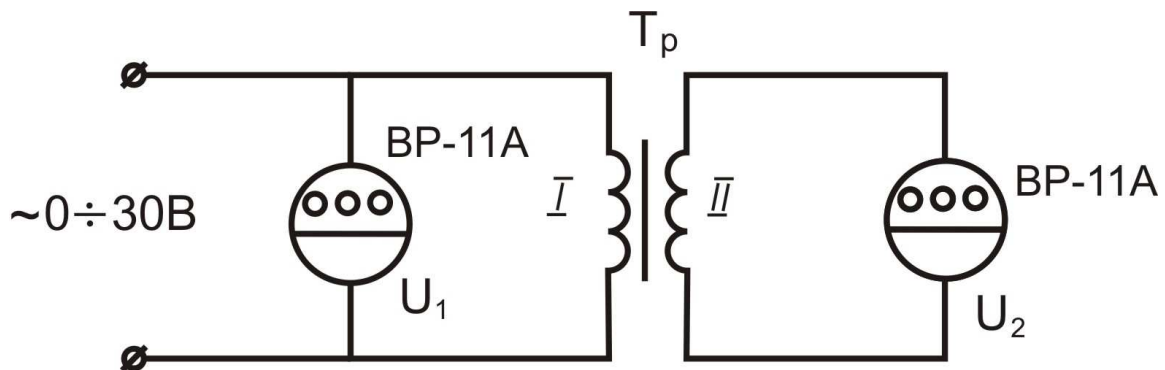


Рис.16.2

3. Робота трансформатора під навантаженням є його основним режимом. Цей режим може бути отриманий взаємним накладенням двох граничних режимів роботи трансформатора - холостого ходу й короткого замикання. Розглядаючи схему, представлену на рис. 15.3, зневажаючи малими величинами втрат в обмотках і магнітопроводі, можемо зробити висновок про те, що при будь-якому навантаженні магнітний потік в осерді повинен зберігатися таким же, як і при холостому ході трансформатора. Для збереження сталості магнітного потоку через осердя необхідне виконання наступної умови для миттєвих значень струмів і напруг:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{U_2}{U_1} . \quad (10)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора можна визначити із загальних міркувань:

$$\eta = \frac{P_{kop}}{P_{затр}} = \frac{i_2 U_2}{i_1 U_1} . \quad (11)$$

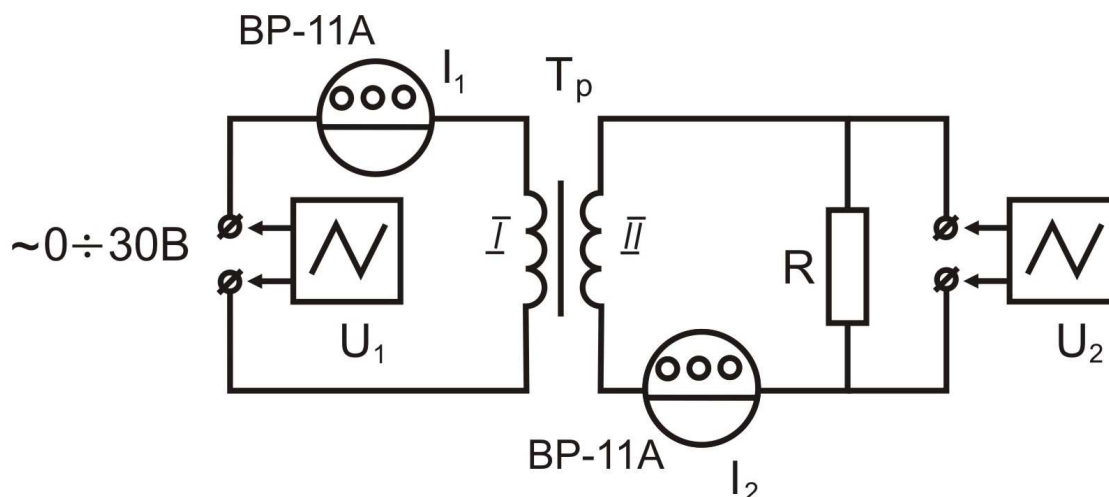


Рис.16.3

### Прилади й приналежності

1. Трансформатор.
2. Мультиметри ВР-11А.
3. Регульоване джерело змінної напруги (до 30 В).
4. Набір резисторів.
5. Осцилограф.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему рис. 16.1 для дослідження режиму холостого ходу. (Мультиметри підготувати до режиму вимірів змінної напруги).
2. Зняти залежність напруги на вторинній обмотці ( $U_2$ ) від напруги ( $U_1$ ), подаваного на первинну обмотку через 2 В в режимі холостого ходу (тобто без навантажувального опору). Результати занести в таблицю 1.
3. За формулою (9) обчислити коефіцієнт трансформації й записати в таблицю 1.

Таблиця 1

$U_1, B$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$U_2, B$										
$k_1$										

За даними таблиці обчислити середній коефіцієнт трансформації для цього випадку.

4. Зібрати схему рис. 16.2 для дослідження режиму короткого замикання.

Мультиметри ВР-11А підготувати до режиму виміру змінної сили струму. (Для цього підключити до приладів вхідні шунти з комплекту приладів).

5. Змінюючи силу струму  $I_1$  в первинній обмотці, вимірювати силу струму  $I_2$  у вторинній обмотці. Результати записати в таблицю 2.

6. За формулою (7) обчислити коефіцієнт трансформації, результати обчислень занести в таблицю 2.

Таблиця 2

$I_1,$ мА										
$I_2,$ мА										
$k_2$										

За даними таблиці обчислити середній коефіцієнт трансформації для цього випадку.

7. Зібрати схему рис.16.3 для дослідження роботи трансформатора при номінальному навантаженні. При цьому мультиметри ВР 11А повинні працювати в режимі виміру сили змінного струму, а осцилограф у представленій схемі використовується як прилад для виміру змінної напруги.

8. Змінюючи  $U_1$  виміряти сили струмів  $I_1$ ,  $I_2$  і напругу на навантажувальному опорі  $U_2$ . Дані занести в таблицю 3.

Таблиця 3

$U_1$ , В	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$I_1$ , мА										
$U_2$ , В										
$I_2$ , мА										
$\eta$										

9. За формулою (11) обчислити ККД ( $\eta$ ) трансформатора для всіх значень вхідної напруги.
10. За даними таблиці 3 побудувати графік залежності  $\eta = f(U_1)$ .

### Контрольні запитання

1. Пояснити фізичні принципи роботи трансформатора.
2. Понижувальні й підвищувальні трансформатори.
3. Коефіцієнт трансформації. Його фізичний зміст.
4. Роль феромагнітного осердя в трансформаторі.
5. Охарактеризувати режим холостого ходу трансформатора.
6. Охарактеризувати режим короткого замикання трансформатора.
7. Одержати робочу формулу для обчислення ККД трансформатора.
8. Застосування трансформаторів в техніці.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №17

### Визначення заряду електрона методом електролізу

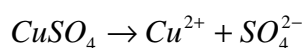
Мета роботи – визначення заряду електрона методом електролізу розчину мідного купоросу ( $CuSO_4$ ).

Проходження електричного струму крізь електроліт супроводжується виділенням на електродах складових частин електроліту. Це явище одержало назву електролізу.

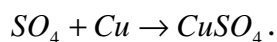
Електроліти – це речовини, в яких при проходженні струму відбуваються хімічні перетворення. Вони відносяться до провідникам другого роду. Нагадаємо, що речовини, в яких проходження електричного струму не супроводжується будь-якими хімічними перетвореннями, називаються провідниками першого роду (до них відносяться, наприклад, метали, електронні напівпровідники). Речовини, у яких при проходженні електричного струму відбуваються хімічні перетворення, називаються провідниками другого роду або електролітами (це розчини солей, лугів або кислот, розплави солей, які в твердому стані є іонні кристали).

Якщо в електроліт ввести електроди і подати на них напругу, іони приходять в упорядкований рух і виникає електричний струм. Позитивно заряджені іони рухаються до негативно зарядженого електроду (катоду), негативно заряджені іони – до позитивно зарядженого електроду (аноду). Після досягнення відповідного електроду іони віддають йому надлишкові або приймають відсутні електрони і перетворюються в нейтральні атоми або молекули. В залежності від хімічної природи електроліту і електродів іони, що нейтралізувалися, або виділяються на електродах, або вступають в реакцію з електродами або розчинником.

Розглянемо цей процес на прикладі  $CuSO_4$ . Мідні електроди занурюють в розчин мідного купоросу. Дисоціація протікає за схемою:



Атоми міді, що нейтралізувалися, відкладаються у виді твердого осадку на катоді. Нейтральна група  $SO_4$  краще вступає в реакцію з міддю, ніж з водою. Тому повторна реакція йде з матеріалом аноду:



Молекула  $CuSO_4$ , що створилася, поступає в розчин. Таким чином, в ході електролізу відбувається розчинення аноду і відкладання міді на катоді, а концентрація електроліту в кінцевому рахунку не змінюється.

Закони електролізу були встановлені експериментально в 1836 році Фарадеєм.

1. Кількість речовини, що виділилася на електроді, пропорційна заряду, який пройшов крізь електроліт:

$$m = kq = k \int_0^t i dt, \quad (1)$$

де  $m$  - маса речовини, що виділилася на електроді,  $k$  - електрохімічний еквівалент, фізичний зміст якого полягає в тому, що він дорівнює масі речовини, що виділилася на електроді, при проходженні крізь електроліт одиниці заряду.

2. Електрохімічні еквіваленти речовини пропорційні їх хімічним еквівалентам:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}, \quad (2)$$

де  $M$  - молярна маса,  $n$  - валентність речовини,  $F$  - число Фарадея, що дорівнює заряду, який необхідно пропустити крізь електроліт, щоб на електроді виділился кілограм-еквівалент  $\left(\frac{M}{n}\right)$  речовини. Кілограм-еквівалент будь-якої

речовини містить  $N = \frac{N_A}{n}$  атомів, які переносять заряд  $F$ , тоді:

$$F = eN_A, \quad (3)$$

де  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - елементарний заряд,  $N_A = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ Моль}^{-1}$  - число Авогадро.

Якщо підставити в (1) вирази (2) і (3), одержимо:



$$m = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{A}{n} It \quad \text{або} \quad m = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n} It, \quad (4)$$

де  $I$  - сила струму,  $t$  - час протікання струму.

З цього співвідношення легко знайти елементарний заряд:

$$e = \frac{VIt}{mN_A n} \quad (5)$$

Для міді  $M = 0.064 \text{ кг} \cdot \text{Моль}^{-1}$ ,  $n = 2$ .

### Прилади і приналежності

1. Блок живлення.
2. Посудина з розчином  $\text{CuSO}_4$ .
3. Електроди.
4. Електрична піч для сушіння електродів.
5. Терези.
6. Міліамперметр (мультиметр)

### Порядок виконання роботи

1. Визначити масу сухого катоду  $m_1$ .
2. Включити електричну схему лабораторної установки в мережу, встановити силу струму, що задана викладачем, і включити секундомер.
3. Через визначений час за вказівкою викладача (20 – 30 хв.) відключити схему, зняти катод, висушити його в печі і визначити його масу  $m_2$ .
4. Дані занести в таблицю.
5. Визначити заряд електрона, використувавши співвідношення (5) і дані таблиці.
6. Розрахувати абсолютну і відносну похибку визначення заряду електрона.

Таблиця

$m_1$	$m_2$	$m = m_2 - m_1$	$I$	$t$	$\Delta m$	$\Delta I$	$\Delta t$
кг	кг	кг	А	с	кг	А	с

### Контрольні запитання

1. Визначення провідників першого и другого роду.
2. Пояснити механізм проходження струму крізь електроліт.
3. Пояснити явище електролізу.
4. Закони електролізу.
5. Одержати робочу формулу для визначення заряду електрона.
6. Намалювати електричну схему лабораторної установки.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №18

### Дослідження повного послідовного кола змінного струму

Мета роботи - визначити параметри послідовного кола, експериментально перевірити закон Ома для повного послідовного кола змінного струму, побудувати векторну діаграму напруги.

Щоб викликати вимушені коливання в коливальному контурі, необхідно надати системі зовнішню додаткову силу, що періодично змінюється. При електричних коливаннях це можна здійснити, якщо ввімкнути послідовно з елементами контуру змінну е.р.с. або, розірвавши контур, подати на контакти, що утворилися, змінну напругу (рис. 18.1).

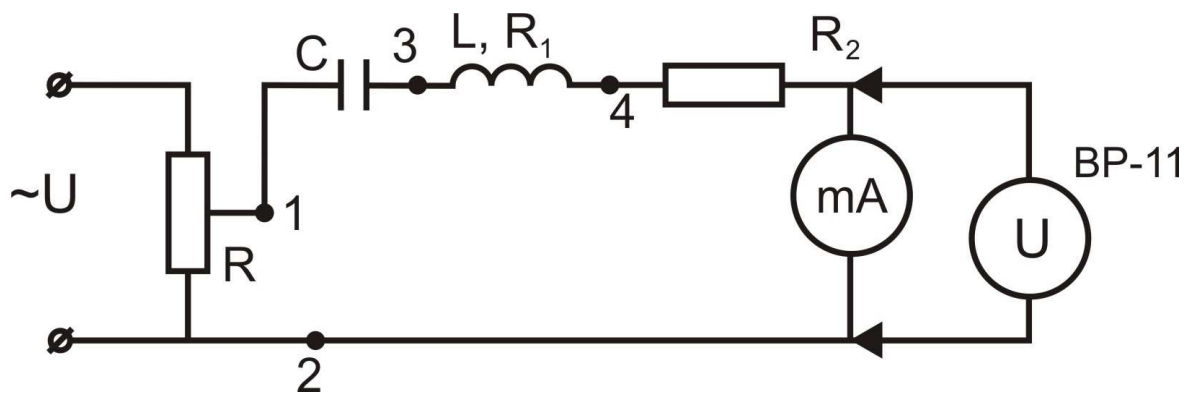


Рис. 18.1

За другим законом Кірхгофа для миттєвих значень падіння напруги і електрорушійних сил в такому колі змінного струму можна скласти таке рівняння:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \int I \frac{dt}{C} = E_0 \sin \omega t. \quad (18.1)$$

Продиференціювавши це рівняння за часом  $t$ , одержимо диференціальне рівняння другого порядку:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = E_0 \omega \cos \omega t. \quad (18.2)$$

Розв'язанням цього рівняння буде вираз:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (18.3)$$

де  $I_0$  - амплітудне значення струму,  $\varphi$  - зміщення за фазою між струмом і напругою. Якщо підставити (18.3) в (18.2), отримаємо:

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (18.4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (18.5)$$

Рівняння (18.4) є законом Ома для повного послідовного кола змінного струму.

А величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} \quad (18.6)$$

називається повним електричним опором (імпедансом) ланцюга.

Будь-який реальний ланцюг має кінцеві значення  $R$ ,  $C$  и  $L$ . В окремих випадках деякі з цих параметрів бувають такими, що їх впливом на струм можна знехтувати. Уявімо собі, що активний опір  $R$  кола можна вважати рівним нулю, а  $C$  - нескінченим. Тоді з формул (18.4) і (18.5) отримуємо співвідношення:

$$I_0 = \frac{E_0}{\omega L}, \quad (18.7)$$

а  $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow \infty$  (відповідно  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ).

Величину

$$X_L = \omega L \quad (18.8)$$

називають реактивним індуктивним опором або просто індуктивним опором кола. При постійному струмі ( $\omega = 0$ ) котушка індуктивності не має індуктивного опору.

Тепер припустимо, що можна покласти рівними нулю  $R$  и  $L$ . Тоді згідно з формулами (18.4) і (18.5)

$$I_0 = \frac{E_0}{1/\omega C}, \quad (18.9)$$

$\operatorname{tg} \varphi \rightarrow -\infty$  (тобто  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ).

Величину

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (18.10)$$

називають реактивним ємнісним опором або просто ємнісним опором. Для постійного струму  $X_c \rightarrow \infty$  - постійний струм через конденсатор протікати не може.

### Прилади та приналежності

1. Котушка індуктивності  $L$  з активним опором  $R_1$ .
2. Конденсатор з електроємністю  $C$ .
3. Резистор з опором  $R_2$ .
4. Джерело змінного струму.
5. Мультиметри.
6. Потенціометр.
- .

### Порядок виконання роботи

1. Скласти схему за рис. 18.1.
2. Ввімкнути електроживлення. Потенціометром встановити вхідну напругу, що задається викладачем (між точками 1 і 2). Напруга вимірюється мультиметром.
3. Виміряти падіння напруги на конденсаторі  $C$  (точки 1, 3), на котушці з індуктивністю  $L$  і активним опором  $R_1$  (точки 3, 4), на резисторі  $R_2$  (точки 2, 4) і силу струму в колі. Дані занести в таблицю.

4. Повторити всі вимірювання п. 3 для всіх значень напруги, заданих викладачем і дані теж занести в таблицю .

5. Обробка результатів. За даними таблиці знайти для кожного значення вхідної напруги:

1)  $L$  і  $R_L$

$$U_L = (U_L + U_{R_1}) - U_{R_1} = (U_L + U_{R_1}) - IR_1 ;$$

$$R_L = \frac{U_L}{I} ; R_L = \omega L , \text{ звідки } L = \frac{R_L}{2\pi f} .$$

2)  $C$  і  $R_C$

$$R_C = \frac{U_C}{I} ; R_C = \frac{1}{\omega C} , \text{ звідки } C = \frac{1}{R_C 2\pi f} .$$

3)  $R$  і  $U_R$

$$U_R = U_{R_1} + U_{R_2} = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) \text{ і } R = R_1 + R_2 = \frac{U_R}{I} .$$

6. Знайти повний опір послідовного кола змінного струму за формулою (18.6).

7. За даними таблиці визначити з закону Ома для кожного значення вхідної напруги повний опір кола і знайти середнє значення повного опору:

$$Z_i = \frac{U_i}{I_i} \text{ и } \langle Z \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i .$$

8. Порівняти результати, отримані в п.п. 6 і 7. Обчислити похибки.

9. За даними таблиці побудувати векторну діаграму напруги, обчислити за допомогою діаграми  $U$  і порівняти її з відповідними значеннями вхідної напруги.

Таблиця

№	$U$ , В	$U_L + U_{R_1}$ , В	$U_C$ , В	$U_{R_2}$ , В	$I$ , мА	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$R_L$ , Ом	$Z$ , Ом	$\langle Z \rangle$ , Ом	$Z_p$ , Ом
1											
2											
3											
...											

## Контрольні запитання

1. Які коливання називаються вимушеними?
2. Вивести закон Ома для повного послідовного кола змінного струму.
3. Активний, ємнісний і індуктивний опори.
4. Як залежать індуктивний і ємнісний опори від частоти струму?
5. Пояснити різницю фаз , що виникає між струмом і напругою на індуктивному і ємнісному опорах.
6. Які значення струму і напруги називаються ефективними? Зв'язок їх з амплітудними значеннями відповідних величин.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №19

### Вивчення затухаючих коливань в RLC – контурі

Мета лабораторної роботи - вивчення затухаючих коливань в RLC – контурі, визначення періоду коливань контуру, логарифмічного декременту затухання і інших параметрів контуру.

В електричних ланцюгах, так само як і в механічних системах, таких як вантажі на пружині або маятник, можуть виникати вільні коливання. Простою електричною системою, здатною здійснювати вільні коливання, є послідовний RLC-контур (рис.19.1).

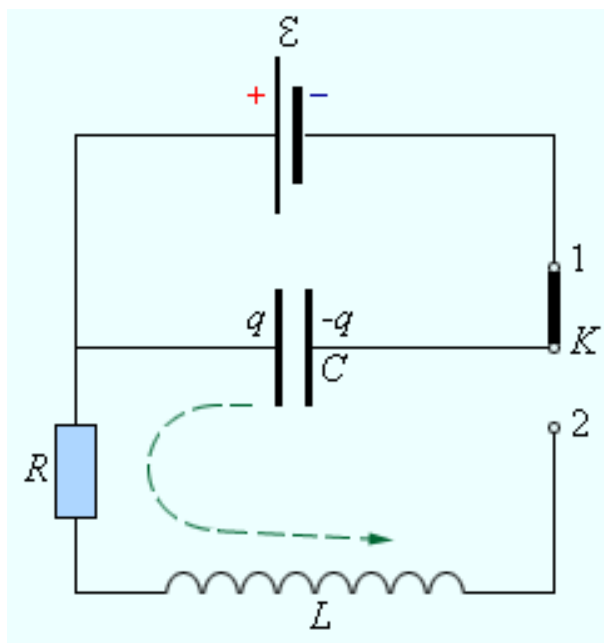


Рис.19.1

Коли ключ  $K$  знаходиться в положенні 1, конденсатор заряджений до напруги  $\mathcal{E}$ . Після перемикання ключа в положення 2 починається процес розрядки конденсатора через резистор  $R$  і котушку індуктивності  $L$ . За певних умов цей процес може мати коливальний характер.



Закон Ома для замкнутого  $RLC$ -кола, що не містить зовнішнього джерела струму, записується у вигляді

$$IR + U = -L \frac{dI}{dt},$$

де  $U = \frac{q}{C}$  – напруга на конденсаторі,  $q$  – заряд конденсатора,  $I = \frac{dq}{dt}$  – струм в колі. У правій частині цього співвідношення знаходиться е.р.с. самоіндукції котушки.

Якщо як змінну величину вибрати заряд конденсатора  $q(t)$ , рівняння, що описує вільні коливання в  $RLC$ -колі, може бути приведено до наступного вигляду:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (1)$$

Якщо в контурі немає втрат електромагнітної енергії ( $R = 0$ ), то вільні коливання в електричному контурі є гармонічними, тобто відбуваються згідно з законом

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Параметри  $L$  і  $C$  коливального контуру визначають тільки власну частоту вільних коливань.

Всі реальні контури містять електричний опір  $R$ . Процес вільних коливань в такому контурі вже не підкоряється гармонічному закону. За кожен період коливань частина електромагнітної енергії, запасеної в контурі, перетворюється на тепло, випромінювання електромагнітних хвиль і коливання стають затухаючими (рис.19.2)

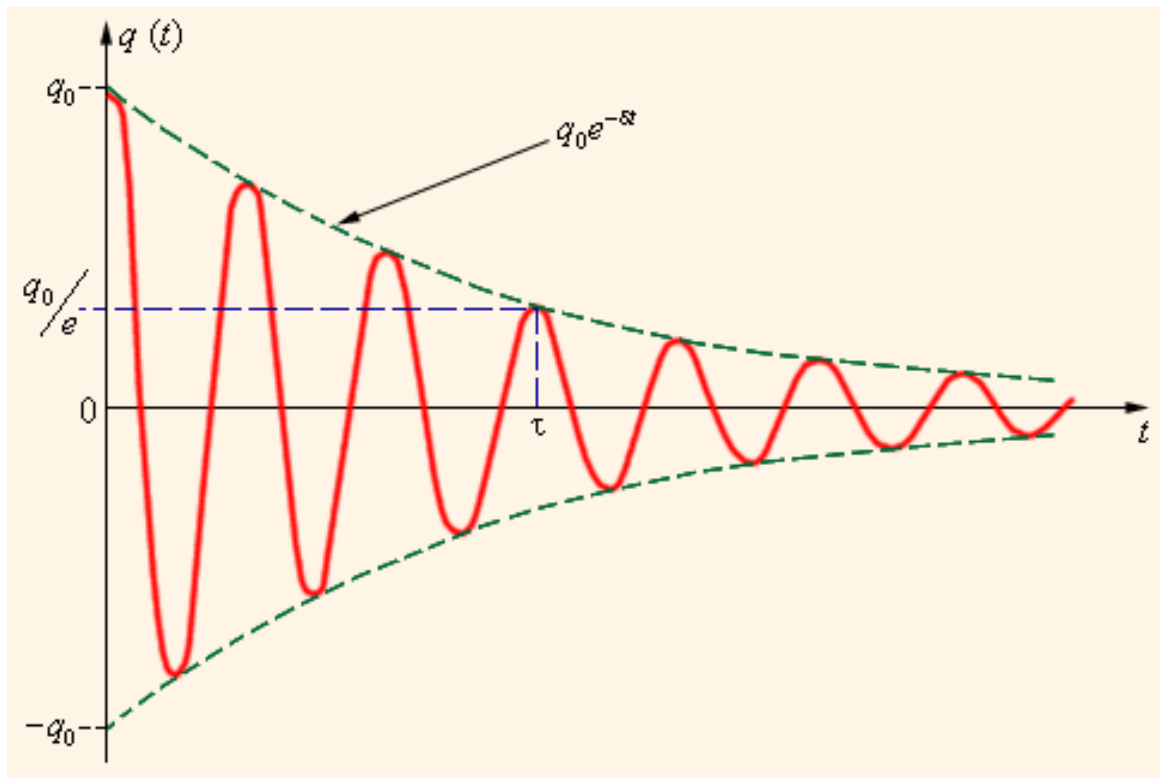


Рис.19.2

Рівняння вільних коливань в контурі за наявності затухання має вигляд (1).

Фізична величина  $\delta = R / 2L$  називається коефіцієнтом затухання. Вирішенням цього диференціального рівняння є функція

$$q(t) = q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

яка містить множник  $\exp(-\delta t)$ , що описує затухання коливань. Швидкість затухання залежить від електричного опору  $R$  контуру.\_

Інтервал часу  $\tau = \frac{1}{\delta}$ , протягом якого амплітуда коливань зменшується в  $e = 2,7$  раз, називається часом затухання.

Затухання коливань зазвичай характеризується убуттям амплітуди за один період  $T$ . Логарифм відношення двох послідовних значень амплітуд називається логарифмічним декрементом затухання коливань

$$\lambda = \delta T$$

Поняття добротності  $Q$  коливальної системи визначає відносний спад енергії коливань за період:

$$Q = \pi N = \pi \frac{\tau}{T},$$

де  $N$  – число повних коливань, що здійснюються системою за час затухання  $\tau$ .

Для RLC- кола добротність  $Q$  виражається формулою

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Добротність електричних контурів, вживаних в радіотехніці, звичайні порядки декілька десятків і навіть сотень.

Затухання контура  $d$  – величина, обернена добротності:

$$d = \frac{1}{Q}.$$

У даній роботі вивчаються затухаючі електромагнітні коливання в коливальному контурі за допомогою осцилографа.

Коливальний контур складається з конденсатора ємністю  $C$ , котушки індуктивності  $L$  і резистора з опором  $R$  (див. рис.19.1 при включеному перемикачі  $K$  в положенні 2).

### Опис установки

Котушка індуктивності  $L$ , конденсатор і один резистор  $R_1$  з'єднуються послідовно (рис. 19.3).

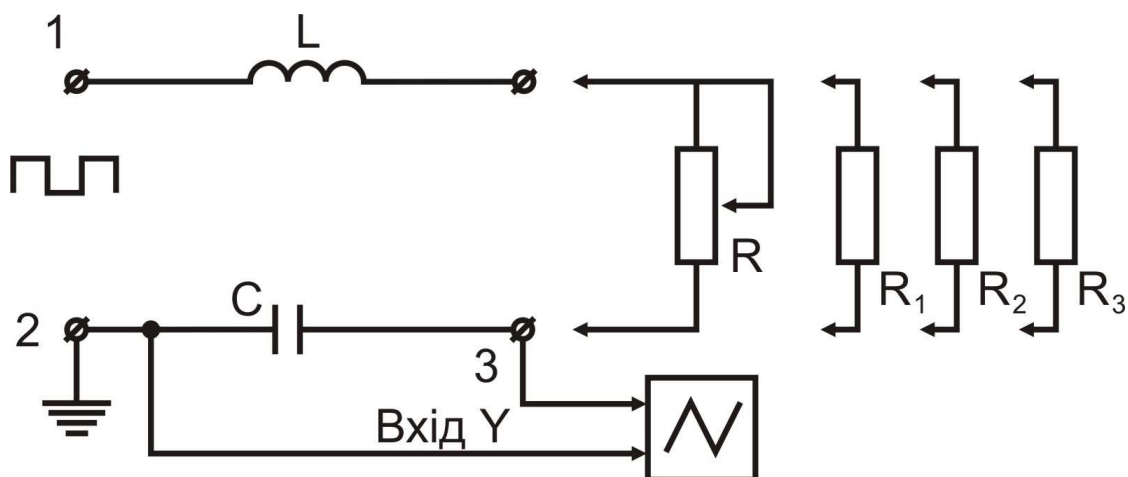


Рис.19.3

На вхід 1-2 ланцюга  $R$ ,  $L$ ,  $C$  подаються прямокутні імпульси частотою  $\approx 100$  Гц, амплітудою від 1 до 10 В. Напруга, що знімається з конденсатора  $C$ , подається на вхід  $Y$  осцилографа (2-3). Затухаючі коливання спостерігаються на екрані осцилографа протягом часу, визначуваному тривалістю імпульсу (рис. 19.2). Для спостереження затухаючих коливань тривалість розгортки осцилографа встановлюють рівною періоду  $T$ .

### Прилади і приналежності

1. Котушка індуктивності (1000 витків).
2. Резистори  $R_1 = 200$  Ом,  $R_2 = 600$  Ом,  $R_3 = 1200$  Ом,  
 $R = 0 \div 10$  кОм.
3. Конденсатор ( $C = 500$  пФ).
4. Генератор прямокутних імпульсів.
5. Осцилограф.
6. Сполучні дроти.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему відповідно до рис.19.3, включити осцилограф і генератор Л 30.
2. Ручками « Стаб.» і «Уров.» на осцилографі встановити стійку картину спостережуваного затухаючого коливання.
3. Перемальовувати по крапках сітки осцилографа в координатах  $u(t)$  і  $t$  картину затухаючих коливань на міліметровий папір. Встановити ціну поділки по осях координат  $u(t)$  і  $t$ .
4. З графіка визначити період  $T$  затухаючих коливань як час між двома послідовними амплітудними значеннями напруги.
5. Обчислити логарифмічний декремент затухання за формулою
$$\lambda = \ln \frac{u(t)}{u(t+T)}.$$
6. Обчислити коефіцієнт загасання  $\delta$  за формулою  $\delta = \frac{\lambda}{T}.$
7. Обчислити час загасання  $\tau$  за формулою  $\tau = \frac{1}{\delta}$  і порівняти його з чисельним значенням з графіка.
8. Обчислити індуктивність  $L$  і добротність  $Q$  за формулами  $L = \frac{R}{2\beta}$  і
$$Q = \frac{\pi}{\lambda}.$$
9. Результати занести в таблицю.

Таблиця

	T	u(t)	u(t+T)	$\lambda$	$\delta$	$\tau$	L	Q
R <sub>1</sub> =								
R <sub>2</sub> =								
R <sub>3</sub> =								

### Контрольні запитання

1. Які коливання називають гармонічними? затухаючими?
2. Якими величинами характеризуються затухаючі коливання і як вони визначаються?
3. Який фізичний зміст добротності коливальної системи?
4. Як впливає величина опору в електричному колі на характеристики затухаючих коливань?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 20

### Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона

Мета роботи – визначення питомого заряду електрона, дослідження його руху в схрещених електричному і магнітному полях (метод магнетрона).

Відношення заряду електрона  $e$  до його маси спокою  $m$  називається питомим зарядом електрона  $e/m$ . У багатьох електронних приладах (електронно-променеві трубки, електронні мікроскопи, прискорювачі заряджених частинок та ін.) використовуються пучки електронів, що рухаються в електричних і магнітних полях. Характер руху (траєкторія, швидкість, прискорення) і сила взаємодії частинок пучка залежать від величини і конфігурації кожного поля, їхнього взаємного розташування, а також від питомого заряду електрона.

Питомий заряд електрона можна визначити, вивчаючи його рух в електричному і магнітному полях. Нехай електрон влітає зі швидкістю  $\vec{v}$  в однорідне магнітне поле індукції  $\vec{B}$ , що спрямоване до нас (рис. 20.1).

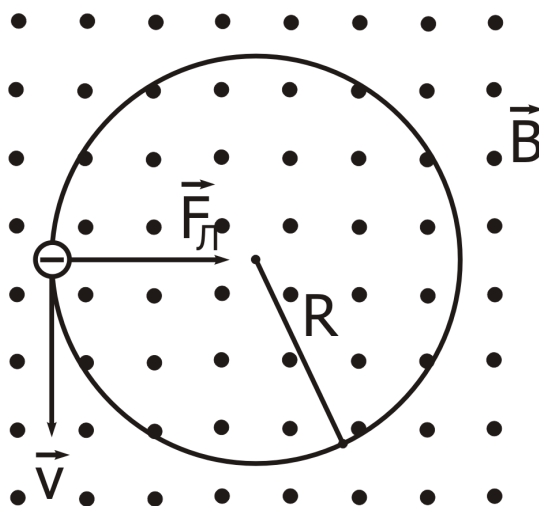


Рис. 20.1

$\vec{B}$  і  $\vec{v}$  взаємно перпендикулярні. На електрон діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Оскільки електрон заряджений негативно, то й напрямок сили визначається правилом правої руки. З формули (1) видно, що сила Лоренца перпендикулярна до швидкості  $\vec{v}$ , отже, відіграє роль доцентрової сили, вона не змінює величини швидкості і кінетичної енергії частинки:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{\text{доц.}},$$

або

$$\frac{mv^2}{R} = evB.$$

Тоді питомий заряд електрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{RB}, \quad (2)$$

де  $R$  - радіус кола, по якому буде обертатися електрон (рис.20.1).

Цей радіус буде зменшуватися, якщо величина швидкості незмінна, а індукція  $B$  зростає.

Якщо перед тим як електрон влітає у магнітне поле, він пройшов зі стану спокою ( $v_0 = 0$ ) в електричному полі різницю потенціалів, що прискорює,  $U$ , то його кінетична енергія дорівнює роботі електричного поля:

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (3)$$

Якщо знайти з рівняння (3) швидкість  $v$  і підставити її в рівняння (2), одержимо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}. \quad (4)$$



## Метод вимірювання й опис установки

Магнетрон являє собою вакуумний діод з катодом непрямого розжарювання і анодом. Катод К розташовується уздовж осі циліндричного анода, так що електричне поле спрямоване уздовж радіуса. Лампа міститься всередині соленоїда, що створює магнітне поле, спрямоване паралельно катоду. Переміщення електронів відбувається в кільцевому проміжку між катодом і анодом магнетрона. Цей рух має кілька відмінностей від того ідеального випадку, який ми аналізували вище.

1) Початкова швидкість  $v_0$  електронів, що вилітають з катода, відмінна від 0. Рівняння (3) повинно мати більш складний вигляд.

2) У магнетроні електрон рухається одночасно в електричному і магнітному полях. Оскільки електричне поле збільшує швидкість електрона, то його траєкторія не буде дугою кола, а має більш складну форму. Ця особливість у лабораторній роботі не дуже істотна, тобто формула (3) справедлива, траєкторії електронів — дуги кіл.

У формулі (4)  $U = U_a$  — анодна напруга.

Введемо ще одне спрощення. Оскільки радіус циліндричного анода  $r_a$  набагато більше радіуса циліндричного катода  $r_k$ , то можна вважати, що  $r_k = 0$ .

Розглянемо траєкторії електронів у магнетроні при різних значеннях індукції магнітного поля  $B$  (рис.20.2). У відсутності магнітного поля траєкторія електрона прямолінійна і спрямована уздовж радіуса анода. У слабкому полі вона являє собою дугу великого радіуса. Анодний струм в обох випадках найбільший. Зі збільшенням індукції  $B$  магнітного поля радіус  $R$  зменшується.

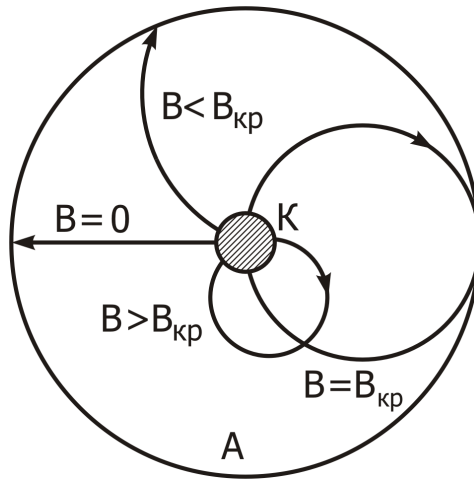


Рис. 20.2

При деякому критичному значенні магнітного поля  $B_{кр}$  електрони рухатимуться по колу, діаметр якого дорівнює радіусу анода; вони ледь торкаються поверхні анода:  $R = 0,5 r_a$ . При  $B > B_{кр}$  електрони рухаються по колах, діаметр яких менше радіуса анода, вони не попадають на анод. Анодний струм дорівнює нулю ( $I_a = 0$ ).

Отже, для  $B = B_{кр}$  формула (4) набуває вигляду

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (5)$$

Індукцію  $B$  магнітного поля соленоїда обчислюємо за формулою

$$B = \mu \mu_0 n I, \quad (6)$$

де  $\mu$  — магнітна проникність середовища ( $\mu = 1$ );

$\mu_0$  — магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ );

$I$  — сила струму в обмотці соленоїда;

$n$  — число витків на одиницю довжини соленоїда.

Підставляючи (6) у (5), одержимо розрахункову формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{\mu^2 \mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 r_a^2}. \quad (7)$$

Таким чином, для обчислення питомого заряду електрона потрібно виміряти анодну напругу  $U_a$ , значення струму  $I_{кр}$  в соленоїді, при якому анодний струм дорівнює нулю;  $n$  і  $r_a$  вказані на лабораторному стенді.

З вищевикладеного може скластися думка, що зміна анодного струму  $I_a$  з ростом струму  $I$  у соленоїді повинна відбуватися так, як показано на рис. 3 штриховою лінією.

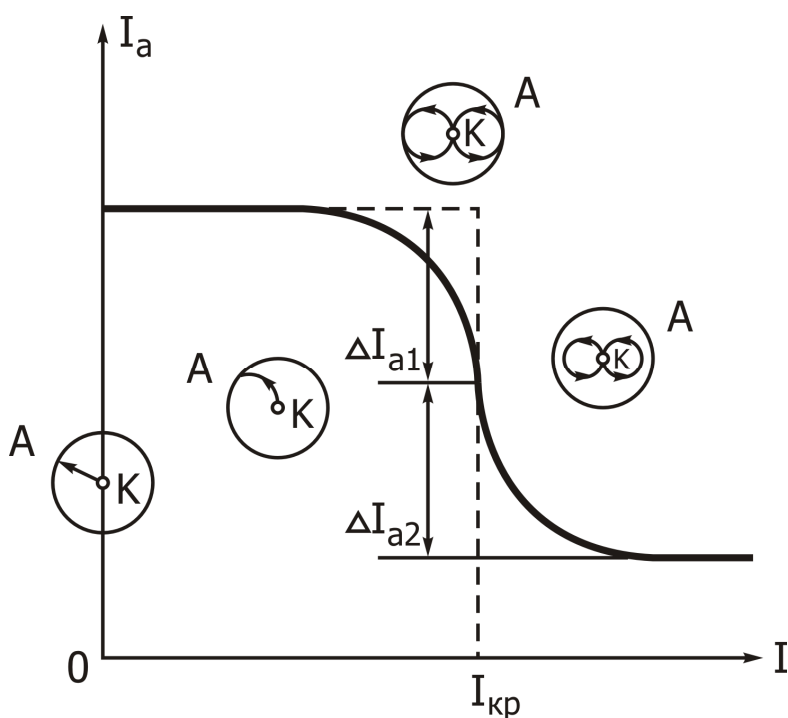


Рис. 20.3

В реальних умовах з ряду причин (різні початкові швидкості електронів, непаралельність поверхонь анода і катода, наявність залишкових газів та ін.) крива  $I_a = f(I)$  спадає більш плавно і не перетинає осі абсцис. Вона зображена на рис. 20.3 суцільною лінією.  $I_{кр}$  визначаємо за таким правилом. Ділянку крутого спаду поділяємо точкою  $Q$  навпіл (тобто  $\Delta I_1 = \Delta I_2$ ). Струм соленоїда, що відповідає точці  $Q$ , є критичним струмом.

Схема електричного кола магнетрона показана на рис. 20.4.  $R_a$  — потенціометр, яким можна підбирати визначену напругу на аноді  $U_a$ . Міліамперметр і вольтметр контролюють роботу анодного кола.

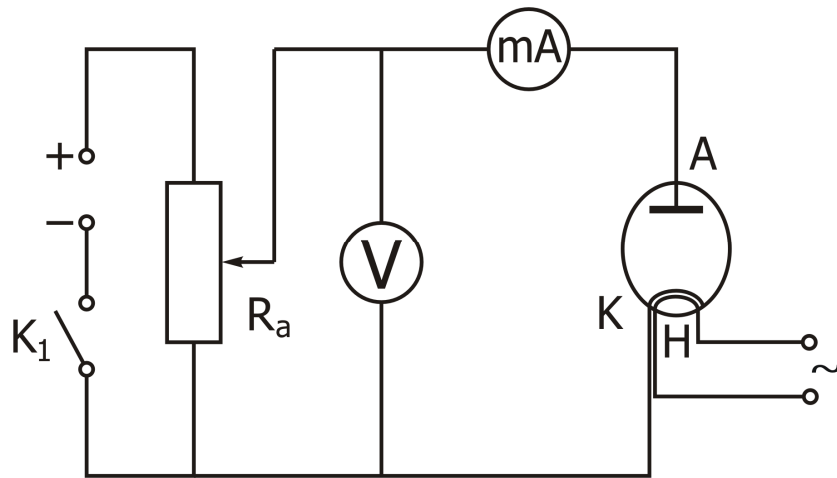


Рис. 20.4

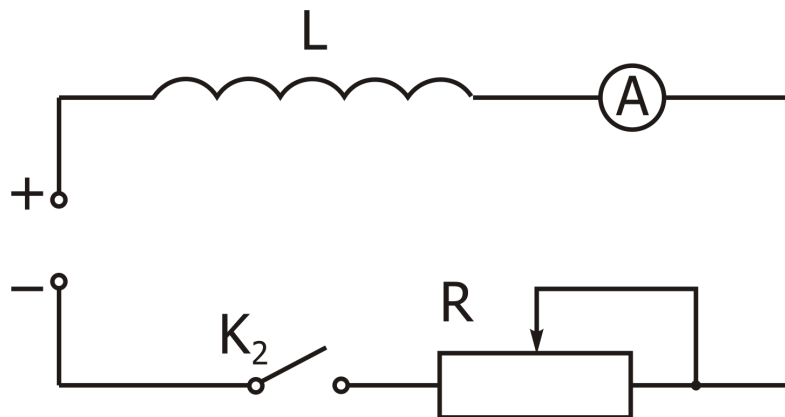


Рис. 20.5

На рис. 20.5 подана схема включення соленоїда, в магнітному полі якого знаходиться магнетрон. Регулюючим резистором  $R$  можна змінювати струм соленоїда  $I$ , величина якого виміряється амперметром  $A$ .

У лабораторній роботі як магнетрон використовують електронну лампу 6E5C, тому що її конструкція повністю задовольняє переліченим вище умовам. Вигляд екрана індикатора наведено на рис. 20.6.

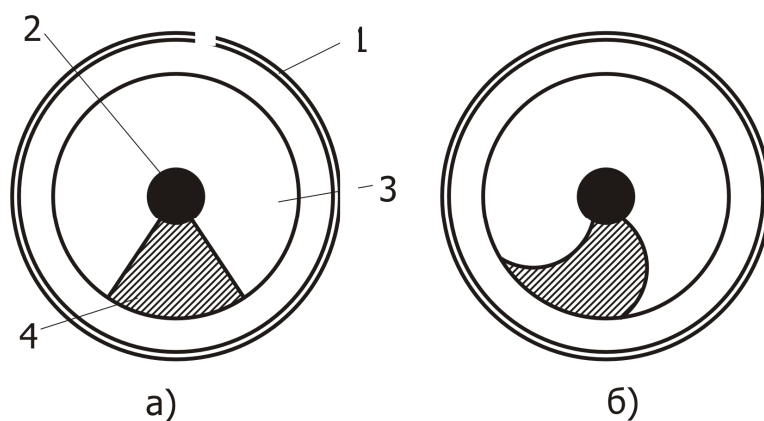


Рис.20.6

Частина електронів, що випускаються катодом лампи, рухається радіально в електричному полі між її катодом і екраном.

Потрапляючи на екран, покритий флуоресціюючою речовиною, ці електрони викликають його світіння. При спостереженні зверху конічний екран лампи дозволяє простежити траєкторії руху електронів від катода до екрана. Крізь отвір в екрані проходить керуючий електрод, з'єднаний з анодом. Напруга на аноді значно менше, ніж на екрані, тому керуючий електрод трохи послаблює поблизу себе електронний потік. На екрані утвориться тінь у вигляді сектора з прямолінійними краями (рис. 20.6, а).

Коли лампа знаходиться в однорідному магнітному полі, паралельному осі катода, електрони відхиляються і рухаються по майже кругових траєкторіях. На рис. 38.6 видно вигин країв темного сектора при наявності магнітного поля, що відповідає траєкторіям руху електронів у цих полях. Одночасно зі зміною світіння відповідних ділянок екрана змінюється анодний струм лампи, убуваючи майже до нуля.

## Прилади і приналежності

Магнетрон; міліамперметр; амперметр; вольтметр; потенціометр; соленоїд; регулюючий резистор; джерела постійного і змінного струму; два ключі.

## Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричні кола магнетрона (рис.20.4) і соленоїда (рис.20.5). Ручку потенціометра  $R_a$  повернути до кінця проти годинникової стрілки. Опір резистора  $R$  зробити максимальним.
2. Замкнути коло ключем  $K_1$ , потенціометром  $R_a$  встановити анодну напругу  $U_a$ , задану викладачем. Ключем  $K_2$  замкнути коло соленоїда. Збільшувати резистором  $R$  струм  $I$  соленоїда з інтервалами  $0,1\text{ А}$  до максимального. Вимірювати величину анодного струму  $I_a$ . Результати вимірів  $U_a$ ,  $I$ ,  $I_a$  записати в таблицю.
3. Для нових значень  $U_a$  дослідити залежність анодного струму  $I_a$  від струму в соленоїді  $I$ , діючи так, як сказано в п. 2. Результати вимірів  $U_a$ ,  $I$ ,  $I_a$  занести в таблицю.
4. Використовуючи таблицю, побудувати графіки  $I_a = f(I)$  на аркуші міліметрівки. Із сімейства кривих вибрати ту, яка спадає найбільш круто, по ній визначити  $I_{кр}$ .
5. За формулою (7) обчислити питомий заряд електрона в системі одиниць СІ. Порівняти отриманий результат з довідковими даними.

Таблиця

$U_a = \quad \text{В}$		$U_a = \quad \text{В}$		$U_a = \quad \text{В}$		$U_a = \quad \text{В}$	
I, А	$I_a, \text{mA}$	I, А	$I_a, \text{mA}$	I, А	$I_a, \text{mA}$	I, А	$I_a, \text{mA}$
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

### Контрольні запитання

1. Які сили діють на електрон, що рухається в магнітному й електричному полях?
2. Що таке сила Лоренца? Як визначається її напрямок? Які Ви знаєте прояви сили Лоренца в природі?
3. Як використовується в техніці сила Лоренца? Назвіть прилади й апарати, в яких вона використовується.
4. Одержати розрахункову формулу.
5. Який струм називають критичним? Як його визначають?
6. Які фізичні основи принципу роботи магнетрона?
7. Як визначити індукцію магнітного поля соленоїда?
8. Чому скидові характеристики не дають різкого “вертикального” зменшення сили анодного струму при значенні  $I_{кр}$ ?

## Список літератури

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.2,3.- М. : Наука, 1990.
2. Зисман Г.А. , Тодес А.М. Курс общей физики. Т.2.- М. :Наука,1972.
3. Базакуца В.А. и др. Лабораторный практикум по физике. Ч.2. - Харьков: Изд-во ХГУ,1969.
4. Фізичний практикум. За заг. ред. проф. В.П.Дущенка. Ч.2.- К.: Вища школа, 1984.
5. Методичні рекомендації до організації самостійної роботи з вивчення курсу фізики.- Харьков: ХНАМГ, 2008.
6. Мультиметр ВР–11А. Руководство по эксплуатации 2.710.042 РЭ.
7. Осциллограф универсальный С1-73. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. И22.044.067ТО, 1988.
8. Устройство вспомогательное для осциллографов (генератор) типа Л 31. Руководство по эксплуатации 3.723.001.
9. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізики. Розділ "Механіка". - Харків: ХНАМГ, 2006.
10. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з розділу "Електрика і постійний струм" курсу загальної фізики. - Харків: ХНАМГ, 2008.



## Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з розділу „Магнетизм, коливання і хвилі” курсу загальної фізики (для студентів 1 курсу денної форми навчання бакалаврів за напрямом 6.050701 – „Електротехніка та електротехнології”).

Укладачі: Катерина Юріївна Аксьонова,  
Юрій Данилович Оксюк,  
Євген Борисович Сидоренко

Редактор: М.З.Аляб'єв

Коректор: З.І. Зайцева

План 2008, поз.223 М

---

Підп. до друку 04 .11.2008	Формат 60x84 1/16	Папір офісний.
Друк на ризографі.	Умовн.–друк. арк. 3,0	Обл.–вид. арк. 3,3.
Зам. №	Тираж 200 прим.	

---

61002, м. Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12  
Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ

---

61002, м. Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

---